



Untersuchungen zu Abrieb bei keramischen Partikeln durch Aufbau und Test einer beheizbaren Scherzelle

Masterarbeit

von cand. et. Alexander Mack

Geprüft von

Prof. Dr. rer. nat. André Thess

Institut für Energiespeicherung (IES)
Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik
Universität Stuttgart

Betreut von

Dipl.-Ing. (FH) Miriam Ebert

und durchgeführt am
Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Institut für Solarforschung (SF)



Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit nur mit den angegebenen Hilfsmitteln, und ohne unerlaubte Hilfe selbstständig angefertigt und verfasst habe.

Stuttgart, den 01.04.2016

Alexander Mack

Abstract

In solar tower power plants the incoming solar radiation is focused on a receiver by a field of heliostats. A heat transfer medium flows through the receiver and is heated to a high temperature level by the concentrated solar radiation. The thermal energy can then be used as process heat or to generate electric energy. There are different kinds of receivers and heat transfer mediums. In this work a concept for a centrifugal particle receiver is considered where solid ceramic particles are used as heat carrier. There is abrasion at the particles due to friction on their way through the receiver. This causes a loss of mass which has to be replaced. Therefore the abrasion at the particles is a cost factor which is relevant for the efficiency of the receiver concept. The database regarding the abrasion behavior of the particles at higher temperatures is insufficient, because of that there is an experimental device developed to determine the abrasion of ceramic particles in a centrifugal particle receiver for solar tower power plants. Thereby the conditions in the receiver shall be reproduced. A heatable ringshear-cell was chosen as concept for the test rig. The thermal design was supported by FEM-analysis with the objective to reach a short heat up time of the device. Subsequently the test rig was built and put successfully into operation.

Kurzzusammenfassung

In Solarturmkraftwerken wird die einfallende Solarstrahlung durch ein Heliostatenfeld auf einen Receiver fokussiert. Der Receiver wird mit einem Wärmetransportmedium durchströmt, das durch die konzentrierte solare Strahlung auf sehr hohe Temperaturen erhitzt wird. Die Wärmeenergie steht dann für die weitere Nutzung als Prozesswärme oder zur Stromerzeugung bereit. Es gibt verschiedene Arten von Receivern und Wärmetransportmedien. In dieser Arbeit wird ein Zentrifugal-Partikelreceiver-Konzept betrachtet, bei dem keramische Partikel das Wärmeträgermedium bilden. Durch die beim Durchlaufen des Prozesses auftretende Reibung entsteht Abrieb an den Partikeln. Dieser bedeutet einen Massenverlust, der ersetzt werden muss. Somit ist der Partikelabrieb ein Kostenfaktor, der für die Wirtschaftlichkeit des Konzepts relevant ist. Die Datengrundlage des Abriebverhaltens der Partikel bei hoher Temperatur ist unzureichend, deshalb wird in dieser Arbeit eine Versuchsvorrichtung für die Bestimmung des Abriebs keramischer Partikel in einem Zentrifugal-Partikelreceiver für Solarturmkraftwerke entwickelt. Dabei sollen die Bedingungen im Receiver nachgebildet werden. Die Wahl des Konzepts für den Teststand fällt auf eine beheizbare Ringscherzelle. Die thermische Auslegung erfolgt mit Hilfe von FEM-Analysen mit dem Ziel, eine möglichst geringe Aufheizzeit der Vorrichtung zu erreichen. Anschließend wird der Teststand aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	iv
Nomenklatur	v
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Schüttguteigenschaften	4
2.2 Thermodynamik	5
3 Konzeption, Konstruktion und Berechnung	10
3.1 Analysieren	11
3.2 Konzipieren	15
3.3 Entwerfen und Berechnen	22
4 Thermische Auslegung.....	40
4.1 Auslegung der Dämmung	40
4.2 Auslegung der Heizung	46
5 Messtechnik und Regelung	52
5.1 Drehzahlmessung.....	52
5.2 Temperaturmessung.....	52
5.3 Mess-und Regelprogramm	53
6 Aufbau.....	54
7 Inbetriebnahme	60
7.1 Funktionstest mit großen Partikeln	60
7.2 Funktionstest mit kleinen Partikeln	61
7.3 Funktionstest mit mittelgroßen Partikeln	62
7.4 Inbetriebnahme der Heizung	63
7.5 Inbetriebnahme der Scherzelle bei erhöhter Temperatur.....	65
7.6 Überprüfung der Aufheizzeit	70
7.7 Bewertung der Ergebnisse der Inbetriebnahme	72
8 Zusammenfassung.....	73
9 Ausblick	74
Literaturverzeichnis	75
10 Anhang.....	77

10.1 Konstruktionszeichnungen	77
10.2 FEM-Dokumentation	90
10.3 Datenblätter	100
10.4 Checkliste Versuchsdurchführung	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 a) prinzipieller Aufbau eines Solarturmkraftwerks mit Partikelreceiver, b) Funktionsprinzip eines Zentrifugal-Partikelreceivers, nach [3].....	2
Abbildung 2 Partikelfilm im Zentrifugalreceiver, nach [3]	2
Abbildung 3 Schematischer Aufbau einer Ringscherzelle, nach [7]	3
Abbildung 4 prinzipieller Aufbau der Versuchsvorrichtung	3
Abbildung 5 Fehlerzone nach Bridgwater, nach [8]	4
Abbildung 6 Scherspannungs- und Dichteverläufe bei unterschiedlichen Verfestigungsgraden [7].....	5
Abbildung 7 Strömungs- und Temperaturprofil einer wandparallelen Strömung [9]	6
Abbildung 8 Bodengruppe mit Lagerung und Antrieb [6]	10
Abbildung 9 Black-Box-Darstellung nach Theumert [10].	14
Abbildung 10 Zentrierung des Deckels.....	16
Abbildung 11 Deckel und Führungsbolzen als ein Teil.....	16
Abbildung 12 Deckel und Führungsbolzen zweiteilig	17
Abbildung 13 Querträger mit Führungsbolzen verbunden, zweiseitige Linearführung	17
Abbildung 14 Querträger mit Führungsbolzen verbunden, einseitige Linearführung	18
Abbildung 15 Formschluss zwischen Führungsbolzen und Querträger	18
Abbildung 16 mechanische Entlastung mit Seilzug	19
Abbildung 17 Entlastung mit verschiebbarem Gegengewicht	19
Abbildung 18 Entlastung mit Hebel und Gegengewichten	20
Abbildung 19 Teilabschnitte zur Bestimmung der Schraubennachgiebigkeit [11]	24
Abbildung 20 Druckbeanspruchte Zone in verspannten Bauteilen [11].....	25
Abbildung 21 Linienkontakt bei Vierkant-Formschluss	30
Abbildung 22 Kontaktfläche zweier sich berührender Zylinder, nach [11]	30
Abbildung 23 Kontakt bei konkav gekrümmtem Körper [11].....	31
Abbildung 24 Führungsbolzen Vierkant	32
Abbildung 25 Linienkontakt bei Verzahnung	33
Abbildung 26 Führungsbolzen mit rinnenförmigen Nuten	33
Abbildung 27 Balkenbiegung nach [11]	35
Abbildung 28 Veranschaulichung des Biegeverhaltens und Biegemomentenverlauf nach [14]	36
Abbildung 29 Schnittbild des Querträgers am Momentenangriffspunkt	37
Abbildung 30 Verlauf des Biegemoments über die Länge des Hebelarms.....	38
Abbildung 31 Lagerung der Entlastungsvorrichtung	39
Abbildung 32 Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Feuerleichtsteine [9]	41
Abbildung 33 Hochtemperaturwolle-Typen [15]	41
Abbildung 34 Wärmeübergang bei mikroporösen Dämmstoffen, nach [16].....	42
Abbildung 35 Zylinderförmige Wärmedämmung	43
Abbildung 36 prinzipieller Aufbau der Wärmedämmung	46
Abbildung 37 Vollkeramischer, elektrischer Strahlungsheizer, nach [19]	47
Abbildung 38 Vereinfachtes Modell der Scherzelle für die FEM-Analysen.....	48
Abbildung 39 Leistungen im stationären Zustand	51

Abbildung 40 Regelschema der Heizung.....	53
Abbildung 41 Übersichtsdarstellung der Versuchsvorrichtung, a) mit Schutzgitter, b) ohne Schutzgitter	56
Abbildung 42 Rahmenkonstruktion des Teststandes	56
Abbildung 43 Gesamt-Unterbau des Teststandes.....	56
Abbildung 44 Montage des Motors	57
Abbildung 45 Aufbau Antrieb und Lagerung	57
Abbildung 46 Antriebswelle der Scherzelle	57
Abbildung 47 Positionierung der Verdreh-Sicherung.....	57
Abbildung 48 Entlastungsvorrichtung	58
Abbildung 49 vollständiger mechanischer Aufbau	58
Abbildung 50 Blechmantel der Wärmedämmung	58
Abbildung 51 Auskleidung der Dämmung mit Kalottenfolie	58
Abbildung 52 Befestigung der Heizelemente	58
Abbildung 53 a) elektrischer Anschluss des Antriebs, b) Schutzgitter	59
Abbildung 54 Unterseite des Deckels nach erstem Funktionstest	61
Abbildung 55 Bodengruppe nach erstem Funktionstest	61
Abbildung 56 Scherzelle nach Funktionstest mit kleinen Partikeln a) Metallspäne im Probenraum b) Riefen im Deckel	62
Abbildung 57 schwarz lackierter Probenraum	62
Abbildung 58 Deckel nach Funktionstest mit mittelgroßen Partikeln	63
Abbildung 59 Schleifspuren an der Wand des Probenraumes beim Funktionstest mit mittelgroßen Partikeln.....	63
Abbildung 60 Dämmung mit Heiz- und Thermoelementen	63
Abbildung 61 Temperaturverlauf der Heizzonen bei der Inbetriebnahme der Heizung	64
Abbildung 62 Blick in den Innenraum der Dämmung bei steigender Temperatur	65
Abbildung 63 Anlassfarben nach Inbetriebnahme der Heizung	65
Abbildung 64 Funktionstest: Erhitzung der Scherzelle	66
Abbildung 65 Scherzelle nach der Erhitzung	66
Abbildung 66 Riefen in der Scherzelle a) Außenwand des Probenraums, b) Innenwand des Probenraums, c) Außenseite des Deckels, d) Innenseite des Deckels	67
Abbildung 67 Anpassung der Geometrie des Deckels	68
Abbildung 68 raue Oberfläche des Deckels an der Kontaktfläche zur Bodengruppe	69
Abbildung 69 Scherzelle nach erfolgreicher Inbetriebnahme	70
Abbildung 70 Staubschicht auf der Unterseite des Deckels	70
Abbildung 71 Abriebspuren am äußeren Rand des Probenraums.....	70
Abbildung 72 Räumliche Ausdehnung der Scherzone	70
Abbildung 73 Positionierung der Thermoelemente im Probenraum	71
Abbildung 74 Vergleich der simulierten Aufheizzeit mit den gemessenen	72
Abbildung 77 Stückliste des Teststands.....	78
Abbildung 78 Konstruktionszeichnung Deckel	79
Abbildung 79 Konstruktionszeichnung Führungsbolzen.....	80
Abbildung 80 Konstruktionszeichnung Querträger	81
Abbildung 81 Konstruktionszeichnung Entlastungshebel	82
Abbildung 82 Konstruktionszeichnung Lagersitz Entlastungshebel	83
Abbildung 83 linke Halbschale der Dämmung	84
Abbildung 84 rechte Halbschale der Dämmung	85

Abbildung 85 Blechmantel der Dämmung, zwei gleiche Halbschalen	86
Abbildung 86 Zuschnitt der mikroporösen Dämmplatten	87
Abbildung 87 Tischkonstruktion	88
Abbildung 88 Konstruktionszeichnung des Schutzgitters	89
Abbildung 89 beispielhafte Zeichnung eines Heizelementes, nach [26]	91
Abbildung 90 Vereinfachtes Modell der Scherzelle	92
Abbildung 91 Proben Temperaturen über der Knotenanzahl (transient)	96
Abbildung 92 Proben Temperaturen über der Knotenanzahl (stationär)	97
Abbildung 93 Leistungen über der Knotenanzahl (stationär)	97
Abbildung 94 Temperaturverteilung in der Versuchsvorrichtung	99
Abbildung 95 Datenblatt Werkstoff 1.4923	101
Abbildung 96 Datenblatt Werkstoff 1.4404	103
Abbildung 97 Datenblatt mikroporöse Dämmplatten MB1000	104
Abbildung 98 Datenblatt Strahlungsheizer STR210	105
Abbildung 99 Datenblatt Strahlungsheizer STR228	106
Abbildung 100 Fertigungszeichnungen der Heizelemente	108
Abbildung 101 Datenblatt induktiver Drehzahlsensor	109
Abbildung 102 Datenblatt Partikel	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Anforderungsliste	11
Tabelle 2 Funktionsanalyse nach Theumert [10]	15
Tabelle 3 morphologischer Kasten	20
Tabelle 4 Nutzwertanalyse nach VDI 2225	21
Tabelle 5 Daten der in Frage kommenden Heizelemente.....	47
Tabelle 6 Untersuchte Heizungskonfigurationen	47
Tabelle 7 Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs.....	49
Tabelle 8 Thermoelemente, Positionen und Aufgaben	52
Tabelle 9 Vorgehensweise bei der Inbetriebnahme	60
Tabelle 10 Untersuchte Heizungskonfigurationen	93
Tabelle 11 Materialdaten Bauxit.....	94
Tabelle 12 Stoffdaten Dämmstoff SILCAPOR High 1050	94
Tabelle 13 Stoffwerte 1.4571 (V4A).....	95
Tabelle 14 Materialdaten heißgepresstes Siliziumnitrid.....	95
Tabelle 15 Netzstudie transiente thermische Analyse	96
Tabelle 16 Netzstudie stationäre thermische Analyse	96
Tabelle 17 Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs.....	98

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
F_s	N	Scherkraft
F_H	N	Haftkraft
F_N	N	Normalkraft
F_Q	N	Querkraft
F_{Kl}	N	Klemmkraft
F_Z	N	Vorspannungskraftverlust
F_{VM}	N	Montagevorspannkraft
F_{VM90}	N	Montagevorspannkraft bei Ausnutzung von 90 % der Streckgrenze des Werkstoffs
F_{Sp}	N	Schraubenspannkraft
F_E	N	Entlastungskraft
F_L	N	Auflagerkraft
k_A	—	Anziehungsfaktor
x	—	Ortskoordinate
\dot{q}_{WL}	W/m	Wärmestrom bei Wärmeleitung
\dot{q}_{Kon}	W/m^2	Wärmestromdichte bei Konvektion
Nu	—	Nusselt-Zahl
L	m	Charakteristische Weglänge (Wärmeübergang)
Re	—	Reynolds-Zahl
w	m/s	Charakteristische Strömungsgeschwindigkeit
Ra	—	Rayleigh-Zahl
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
T	K	Absolute Temperatur
a	$m^2 \cdot s$	Temperaturleitfähigkeit des Fluids
Pr	—	Prandtl-Zahl
c_p	$kJ/(kg \cdot K)$	Spezifische Wärmekapazität
\dot{e}	W/m^2	Energiestromdichte
k	$W/(m^2 \cdot K^4)$	Stefan-Boltzmann Konstante
C_{12}	$W/(m^2 \cdot K^4)$	Strahlungsaustauschzahl
n	min^{-1}	Drehzahl
M_{mot}	Nm	Motordrehmoment
M_{AZ}	Nm	Anziehdrehmoment
M_B	Nm	Biegemoment
p	N/m^2	Druck
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
fp	N/mm^2	Flächenpressung
fp_H	N/mm^2	Hertz'sche Flächenpressung
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Streckgrenze des Werkstoffs
d	mm	Durchmesser
r	mm	Radius
z	—	Anzahl
l	mm	Länge
B	mm	Balkenbreite
H	mm	Balkenhöhe
h	mm	Höhe der Aussparung im Querschnitt des Balkens
ha	mm	Hebelarm
e	mm	Abstand zwischen neutraler Faser und Zug-/Druckfaser

D_A	mm	Querausdehnung der verspannten Bauteile
f_z	mm	Setzbetrag
A	mm^2	Fläche
P	—	Gewindesteigung
S	—	Sicherheitsfaktor
\dot{Q}	W	Wärmestrom
W_t	mm^3	Widerstandsmoment gegen Torsion
W_B	mm^3	Widerstandsmoment gegen Torsion
I_a	mm^4	Axiales Flächenträgheitsmoment

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
σ	N/mm^2	Spannung
σ_M	N/mm^2	Montagezugspannung
σ_z	N/mm^2	Zugspannung
σ_B	N/mm^2	Biegespannung
τ_s	N/mm^2	Scherspannung
τ_t	N/mm^2	Torsionsspannung
ρ	kg/m^3	Dichte
Δ_w	m/s	Geschwindigkeitsgradient
Δ_θ	$^\circ C$	Temperaturgradient
δ	mm/N	Nachgiebigkeit
λ	$W/(m \cdot K)$	Wärmeleitfähigkeit
ϑ	$^\circ C$	Temperatur
α	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmeübergangskoeffizient
ν	$m^2 \cdot s$	Kinematische Viskosität
β	$1/K$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
ΔT	K	Temperaturdifferenz
ε	—	Emissionsgrad
μ	—	Reibungszahl
ν	—	Querkontraktionszahl (Poissonzahl)
μ_G	—	Gewindereibwert

Tiefgestellte Indizes

SG	Schüttgut
WL	Wärmeleitung
W	Wand
Kon	Konvektion
F	Fluid
ref	Referenz
R	Strahlung
min	Minimal
max	Maximal
a	Außen
i	Innen
ges	Gesamt-
K	Schraubenkopf
G	Eingeschraubtes Gewinde
M	Mutter
S	Schraube
T	Verspannte Bauteile
LK	Lochkreis
N	Nenn-

<i>w</i>	Schraubenkopfauflage
<i>ers</i>	Ersatz-
<i>h</i>	Durchgangsloch
<i>k</i>	Klemm-
<i>s</i>	Spannungs-
<i>A</i>	Auslegungs-
<i>fp</i>	Flächenpressung
<i>b</i>	Entwurf b
<i>tat</i>	tatsächlich
<i>Nut</i>	Nuten
<i>zul</i>	zulässig
<i>Hebel</i>	Hebelarm der Entlastungsvorrichtung
<i>Bolzen</i>	Lagerbolzen der Entlastungsvorrichtung
<i>Zylinder</i>	Zylinderförmige Dämmung
<i>Luft</i>	Luft
<i>D</i>	Dämmstoff
<i>Heiz</i>	Heizung
<i>HE</i>	Heizelemente
<i>SZ</i>	Scherzelle
<i>HZ</i>	Beheizte Zone der Heizelemente
<i>V</i>	Verlust
<i>Welle</i>	Wellenansatz
<i>o</i>	Nach oben
<i>FB</i>	Führungsbolzen

Abkürzungen

BP	British Petroleum
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
CSP	Concentrated Solar Power
WTM	Wärmeträgermedium
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
CentRec	Zentrifugal-Partikelreceiver
FEM	Finite Elemente Methode
HTW	Hochtemperaturwolle

1 Einleitung

Die gesicherte Energieversorgung ist eine zentrale Anforderung für das Funktionieren unserer heutigen Gesellschaft. Wie aus dem „Statistical Review of World Energy“ von BP [1] hervorgeht, wird dieser Energiebedarf derzeit hauptsächlich durch die Nutzung fossiler Energieträger gedeckt. Die Vorräte dieser Energieträger sind endlich. Darüber hinaus entstehen bei der Umwandlung der in fossilen Brennstoffen enthaltenen chemischen Energie in Wärmekraftmaschinen Emissionen, die einen negativen Einfluss auf die Umwelt haben. Dazu gehören Feinstaub, Stickoxide und vor allem Kohlenstoffdioxid (CO_2). Dieses Gas verstärkt den Treibhauseffekt und trägt somit laut dem aktuellen Sachstandsbericht des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) [2] „sehr wahrscheinlich“ zur Erderwärmung bei.

Eine Reduzierung der CO_2 Emissionen lässt sich durch effizienteren Umgang mit den fossilen Energieträgern und verstärkter Nutzung regenerativer Energien erreichen. Für industrielle Prozesse und zur effizienten Stromerzeugung mittels Wärmekraftmaschinen wird Wärme auf hohem Temperaturniveau benötigt. Diese lässt sich solar mit Hilfe konzentrierter Sonnenstrahlung (concentrated solar power, CSP) erzeugen. Hierbei wird zwischen linienfokussierenden und punktfokussierenden Systemen unterschieden, wobei letztere ein höheres Temperaturniveau erreichen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den punktfokussierenden Systemen. Prinzipiell wird bei solchen Systemen die solare Einstrahlung mit der Sonne nachgeführten Spiegeln (Heliostaten) auf einen Empfänger (Receiver) fokussiert, der auf einem Turm angebracht ist. Im Receiver wird die Energie auf ein Wärmeträgermedium (WTM) übertragen, das den Transport der Energie zum Einsatzort ermöglicht.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Receiver auszuführen, die vom eingesetzten WTM abhängig sind. Beispiele hierfür sind die Direktverdampfung von Wasser oder die Erhitzung von Luft, Flüssigsalzen oder keramischen Partikeln. Für einen Betrieb rund um die Uhr muss ein Teil der tagsüber gewonnenen Wärme gespeichert werden, sodass die Anlage auch nachts Energie liefern kann. Abbildung 1 a) veranschaulicht den Aufbau eines Solarturmkraftwerks mit Partikelreceiver. Nach der Erhitzung im Receiver werden die Partikel in einem Hochtemperaturspeicher zwischengelagert. Anschließend durchlaufen sie einen Wärmeübertrager und gelangen daraufhin in einen Niedrigtemperaturspeicher. Von dort werden sie mit Hilfe eines Lifts zum Receiver befördert und der Kreislauf beginnt erneut.

Die Grundlage dieser Arbeit bildet die Betrachtung eines am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelten Zentrifugal-Partikelreceivers (CentRec), dessen Funktionsschema in Abbildung 1 b) zu sehen ist. Der Receiver besteht aus einem Hohlzylinder, der um seine Längsachse rotiert und einem Einspeisekegel. Dabei handelt es sich um einen doppelwandigen Kegel mit axial angeordneten Lamellen. Der Einspeisekegel hat die Aufgabe, die Partikel auf Umfangsgeschwindigkeit zu beschleunigen und an die innere Wand des Hohlzylinders zu führen. Durch die Rotation des Receivers werden die Partikel an die Innenwand gedrückt und gleiten aufgrund der Gravitation nach unten in Richtung Partikelaustritt. Auf ihrem Weg absorbieren die Partikel die in den Zylinder einfallende Solarstrahlung direkt und werden dadurch erhitzt.

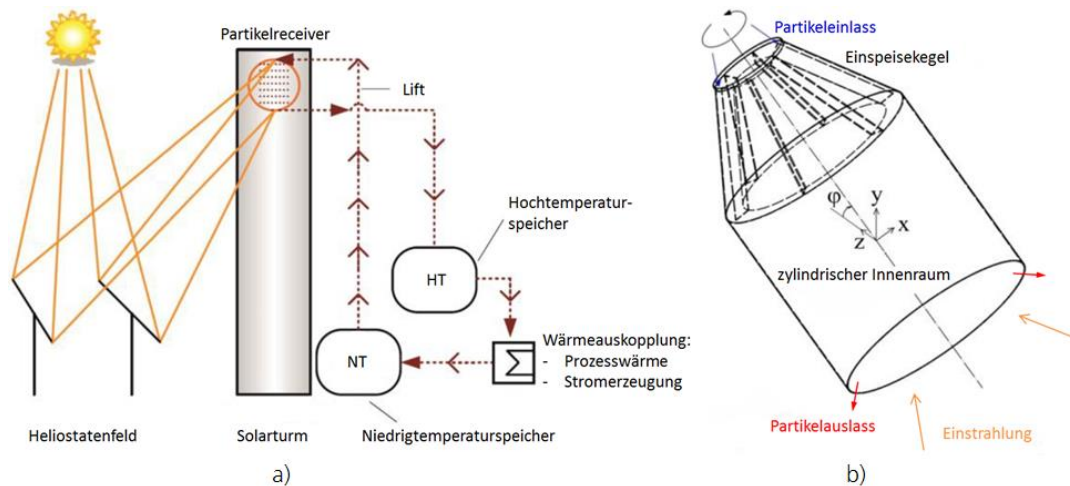


Abbildung 1 a) prinzipieller Aufbau eines Solarturmkraftwerks mit Partikelreceiver,
b) Funktionsprinzip eines Zentrifugal-Partikelreceivers, nach [3]

Für eine kontinuierliche Partikelbewegung und somit einen konstanten Massenstrom ist eine raue Oberflächenbeschaffenheit der Zylinderwand notwendig [3]. Abbildung 2 zeigt eine Schnittdarstellung des Hohlzylinders. Am unteren Rand ist eine Blende zu erkennen, die die axiale Bewegung der wandnahen Partikel verhindert. Dadurch bildet sich ein statischer Partikelfilm an der Innenwand des Hohlzylinders aus. Dieser Partikelfilm bildet die raue Oberfläche, über die sich ein dynamischer Partikelfilm bewegt. Durch die Relativbewegung der Partikelfilme zueinander kommt es zu Kontakten zwischen den Partikeln, die zu Verschleiß führen.

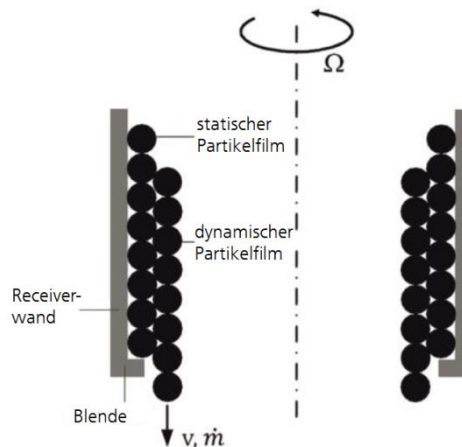


Abbildung 2 Partikelfilm im Zentrifugalreceiver, nach [3]

Bei den verwendeten Partikeln handelt es sich um keramische Partikel aus gesinterem Bauxit, deren Eignung für den Einsatz bei CSP-Anwendungen in einer gemeinsamen Studie der SANDIA National Laboratories und der Bucknell University (beide USA) nachgewiesen wurde [4]. Demnach bestehen die Partikel zum größten Teil aus Aluminiumoxid Al_2O_3 . Weitere Bestandteile sind Eisen(III)-Oxid Fe_2O_3 , Siliziumdioxid SiO_2 und Titandioxid TiO_2 . Das enthaltene Eisen(III)-Oxid verursacht eine Schwarzfärbung, dadurch liegt der Absorptionsgrad bei bis zu 93 %. Eine Agglomeration tritt bis zu einer Temperatur von 1000 °C nicht ein. Grund dafür sind die gute Rundheit (Sphärizität $> 0,9$) und Hitzebeständigkeit der Partikel. Weiterhin ist die Thermoschockbeständigkeit sehr hoch und die Partikel sind relativ kostengünstig (0,5 bis 1 €/kg).

Die Datenlage bezüglich des Verschleißes der Partikel ist sehr gering [5], deshalb soll in dieser Arbeit eine Versuchsvorrichtung entwickelt werden, mit deren Hilfe das Verschleißverhalten bei den Be-

dingungen im Zentrifugalreceiver untersucht werden kann. Der Autor einer vorangegangenen Arbeit [6] hat sich bereits mit diesem Thema beschäftigt und den prinzipiellen Aufbau des Teststandes festgelegt.

Zentrales Element ist eine Ringscherzelle. Der schematische Aufbau eines solchen Schergerätes ist in Abbildung 3 dargestellt. Im Wesentlichen besteht eine Ringscherzelle aus zwei Bauteilen, die im Folgenden als Deckel und Boden bezeichnet werden. Eines der Bauteile rotiert, wohingegen die Drehbewegung des anderen verhindert wird. Dadurch entsteht eine Scherbelastung auf die Partikel, die sich im Probenraum befinden.

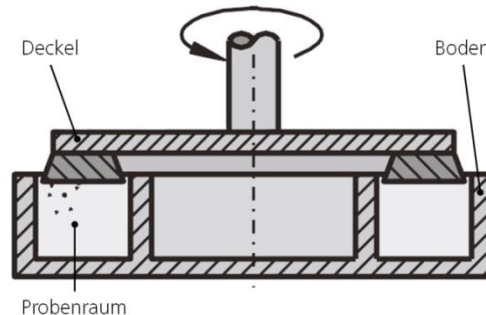


Abbildung 3 Schematischer Aufbau einer Ringscherzelle, nach [7]

Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau der gesamten Versuchsvorrichtung. Die Scherbelastung der Partikel ist abhängig von der Normalkraft, die auf die Partikelprobe wirkt. Zur Variierung der Belastung ist eine Entlastungsvorrichtung vorgesehen. Zur Nachbildung der Bedingungen im Zentrifugalreceiver soll die gesamte Ringscherzelle auf bis zu 900 °C erhitzbar sein. Deshalb ist eine entsprechende Wärmedämmung notwendig.

Die detaillierte Auslegung und Konstruktion der Bodengruppe (grün umrandeter Bereich) wurde in der vorangegangenen Arbeit bereits vorgenommen. Darauf aufbauend ist der Inhalt dieser Arbeit die Konstruktion der Deckeleinheit, der Verdreh-Sicherung und der Entlastungsvorrichtung. Ein weiterer Bestandteil ist die Auslegung der Heizung und der Wärmedämmung. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist der Aufbau und die Inbetriebnahme der Versuchsvorrichtung.

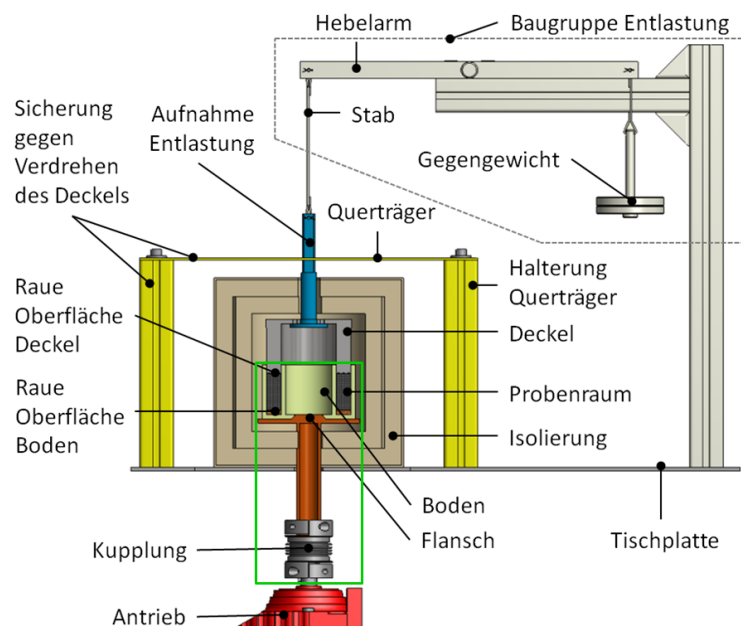


Abbildung 4 prinzipieller Aufbau der Versuchsvorrichtung

2 Theoretische Grundlagen

Voraussetzung für die eigentliche Konstruktion der Versuchsvorrichtung ist ein Verständnis darüber, welche Prozesse im Betrieb der Vorrichtung stattfinden werden. Nur dadurch kann bestimmt werden, welche Belastungen zu erwarten sind und wie die Dimensionierung der Komponenten dementsprechend erfolgen muss. Zunächst wird die zu untersuchende Partikelprobe betrachtet. Dabei wird die Gesamtheit der Partikel als sogenanntes Schüttgut bezeichnet, dessen Eigenschaften durch die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Partikeln beeinflusst werden. Des Weiteren werden die unterschiedlichen auftretenden Wärmetransportmechanismen diskutiert, um Entscheidungen über die Art und Weise der Heizvorrichtung treffen zu können.

2.1 Schüttguteigenschaften

Der Autor der vorangegangenen Arbeit [6] hat sich bereits mit den Eigenschaften von Schüttgütern in Bezug auf die Vorgänge in der zu entwickelnden Schervorrichtung beschäftigt. Im Folgenden wird deshalb der Schwerpunkt auf diejenigen Schüttguteigenschaften gelegt, die unmittelbaren Einfluss auf die Konstruktion haben.

Das Verhalten von Schüttgütern kann zwischen dem von Newton'schen Fluiden und dem von Festkörpern variieren. Je stärker das Schüttgut verdichtet ist, desto eher verhält es sich wie ein Festkörper. In der Realität ist meistens ein Zustand zwischen den beiden Extremen anzutreffen [7]. In der Versuchsvorrichtung wird die Oberseite der Partikelprobe mit der Scherkraft F_s gegen die Unterseite verschoben. Dadurch entsteht eine Scherspannung in der Probe, die zu einer Bewegung der Partikel relativ zueinander führt. Diese Bewegung findet größtenteils in einer sogenannten Fehlerzone statt (s. Abbildung 5), die ungefähr 10 Partikelschichten dick ist [8].

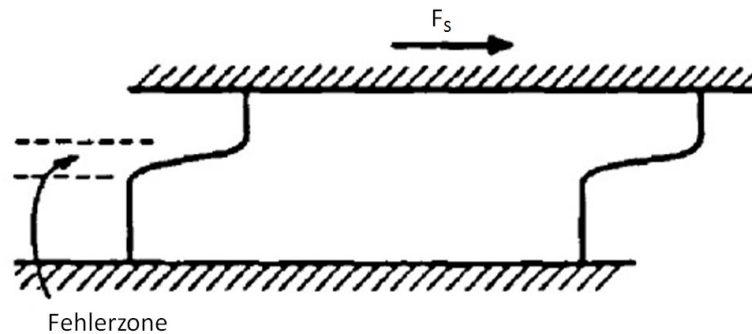


Abbildung 5 Fehlerzone nach Bridgwater, nach [8]

Voraussetzung für die Ausbildung der Fehlerzone ist Haftung der äußeren Partikelschichten an den Begrenzungsflächen. Deshalb muss die Reibung an diesen Flächen konstruktiv entsprechend angepasst werden.

Die zur Erzeugung dieser Bewegung notwendige Scherkraft F_s hängt unter anderem von der Haftkraft F_H der Partikel untereinander ab. Diese wird bei trockenen Schüttgütern vor allem durch Van-der-Waals-Kräfte verursacht und ist umso stärker, je geringer der Abstand zwischen den Partikeln ist. Damit lassen sich die in Abbildung 6 dargestellten Verläufe der Scherspannung τ_s und der Schüttgutdichte ρ_{SG} erklären. Wird eine unterverfestigte Probe in der Schervorrichtung untersucht, verringern sich die Abstände der Partikel durch die Aufbringung der Normalkraft F_N zunächst.

Dadurch steigen die Haftkräfte F_H an, bis ein stationärer Zustand erreicht ist. Ist die Probe vor Versuchsbeginn bereits überverfestigt, steigt die Scherspannung τ_s bis zur Fließgrenze an. Durch die Bewegung vergrößern sich die Abstände zwischen den Partikeln und die Haftkräfte F_H nehmen ab.

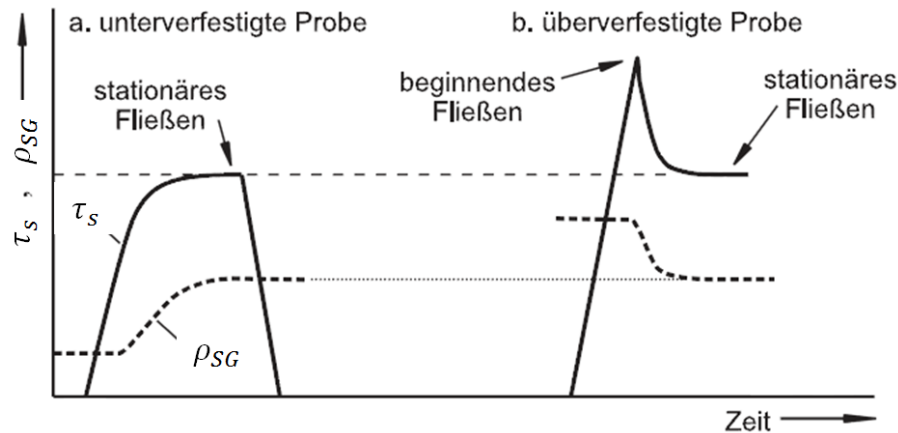


Abbildung 6 Scherspannungs- und Dichteverläufe bei unterschiedlichen Verfestigungsgraden [7]

Die Scherkraft F_s wird dadurch hervorgerufen, dass eine Drehbewegung des Deckels der Scherzelle, bei gleichzeitiger Rotation der Bodengruppe, verhindert wird. Durch das Aufsetzen des Deckels findet eine Verfestigung der Partikelprobe statt. Dadurch muss bei Beginn der Rotation eine größere Scherkraft F_s aufgebracht werden, als für das stationäre Fließen notwendig ist. Die Verdreh-Sicherung muss dementsprechend ausgelegt werden. Außerdem vergrößert sich das Volumen der Partikelprobe, was dazu führt, dass der Deckel angehoben wird. Daraus folgt, dass die Verdreh-Sicherung des Deckels der Scherzelle so konstruiert sein muss, dass stets eine Bewegung in vertikaler Richtung möglich ist.

2.2 Thermodynamik

Die Scherzelle mit der Partikelprobe soll beheizt werden, um die Bedingungen im Zentrifugalreceiver bzw. im Partikelspeicher nachzubilden. Zur Bestimmung der notwendigen Heizleistung und zur Auslegung der Wärmedämmung ist eine Untersuchung der stattfindenden Wärmetransportprozesse notwendig. Aufgrund der Komplexität der Vorrichtung und der daraus resultierenden Anzahl an Randbedingungen wird die Analyse mit Hilfe von Computersimulationen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Die Ergebnisse der FEM-Analysen müssen jedoch vor Verwendung in Hinblick auf ihre Plausibilität geprüft werden. Dazu ist die Kenntnis der thermodynamischen Vorgänge innerhalb der Versuchsvorrichtung notwendig. Die Grundlagen und die Berechnungsvorschriften in diesem Kapitel wurden dem VDI Wärmeatlas [9] entnommen.

Wärme ist äquivalent zur kinetischen Energie der kleinsten Teilchen eines Stoffes, der Atome bzw. Moleküle. Daraus erschließt sich die Definition der absoluten Temperaturskala (Kelvin-Skala), wonach am Nullpunkt keinerlei Molekularbewegung mehr stattfindet. Jeder Körper, dessen absolute Temperatur mehr als 0 K beträgt, enthält demnach eine gewisse Wärmemenge. Diese Wärme kann auf andere Körper übergehen. Im Allgemeinen unterscheidet man drei Arten des Wärmetransports: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Bei allen Mechanismen ist der Temperaturgradient die treibende Kraft für den Wärmetransport. Außerdem zeigt gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik der Richtungsvektor des Energieflusses stets vom heißeren auf den kälteren Körper [9].

2.2.1 Wärmeleitung

Die Bewegung der kleinsten Teilchen eines Stoffes ist chaotisch und wird durch immer neue Zusammenstöße mit anderen Teilchen beeinflusst. Wärmeleitung beschreibt den Energietransport innerhalb eines Stoffes durch den Zusammenprall benachbarter Moleküle, bei dem sich die kinetische Energie der beiden Stoßpartner ändert. Dieser Mechanismus ist unabhängig von makroskopischen Bewegungen des Stoffes und findet somit sowohl in Feststoffen, als auch in Flüssigkeiten und Gasen statt. In Metallen tragen zudem freie Elektronen zum Energietransport bei [9]. Die, auf die Fläche bezogene, übertragene Wärmemenge hängt neben dem Temperaturgradienten entlang der Ortskoordinate x nur von einem Stoffwert ab, der Wärmeleitfähigkeit λ .

Der Zusammenhang wird durch das Fouriersche Gesetz (Gl. (1)) beschrieben. Das negative Vorzeichen liegt in der Tatsache begründet, dass ein positiver Wärmestrom \dot{q}_{WL} stets in Richtung des negativen Temperaturgradienten fließt.

$$\dot{q}_{WL} = -\lambda * \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (1)$$

2.2.2 Konvektiver Wärmeübergang

Konvektion beschreibt den Wärmetransport in strömenden Medien. Dabei findet in solchen Medien neben Wärmeleitung zusätzlich ein Stoff-, und somit Energietransport, durch makroskopische Stoffbewegungen statt. Diese Art des Energietransports kommt nur bei Gasen und Flüssigkeiten vor und hängt nicht ausschließlich von Stoffwerten ab, sondern auch vom Bewegungszustand des Mediums. Die Wärmestromdichte ist daher bedingt durch die Strömungsgeschwindigkeit und den Turbulenzgrad des Fluids.

Für technische Anwendungen ist vor allem die Betrachtung des konvektiven Wärmeübergangs an der Begrenzung des strömenden Mediums, also der Bauteiloberflächen, relevant. Dabei ist zu beachten, dass bei allen Newtonschen Fluiden Wandhaftung gilt. Dadurch ist die Strömungsgeschwindigkeit direkt an der Wand aufgrund von Reibung gleich Null. Es bildet sich dadurch ein Strömungsprofil, wie in Abbildung 7 auf der linken Seite dargestellt, aus. Auf der rechten Seite ist der Temperaturverlauf einer solchen Strömung zu sehen. In den wandnahen Bereichen sind große Gradienten zu erkennen (Geschwindigkeitsgradient Δ_w bzw. Temperaturgradient Δ_ϑ). Diese Zonen nennt man Geschwindigkeitsgrenzschicht bzw. Temperaturgrenzschicht.

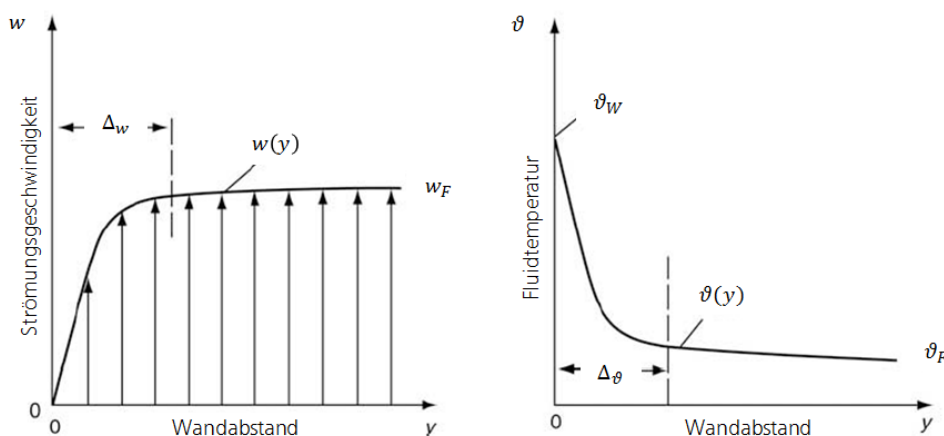


Abbildung 7 Strömungs- und Temperaturprofil einer wandparallelen Strömung [9]

Die Richtung des konvektiven Wärmeübergangs ist abhängig vom Temperaturgradienten. Ist die Wandtemperatur ϑ_W höher als die Fluidtemperatur ϑ_F , wird Wärme von der Wand zum Fluid transportiert. Ist die Fluidtemperatur höher, geht Wärme vom Fluid auf die Wand über. Die Wärmestromdichte \dot{q}_{Kon} lässt sich mit Gl. (2) berechnen.

$$\dot{q}_{Kon} = \alpha * (\vartheta_W - \vartheta_F) \quad (2)$$

Die Wärmestromdichte \dot{q}_{Kon} ist abhängig von Stoffwerten, Strömungszustand sowie Geometrie und Beschaffenheit der Oberfläche der Wand. Der mit Gl. (2) beschriebene einfache Zusammenhang lässt sich erst durch eine Zusammenfassung dieser Abhängigkeiten zu dem Wärmeübergangskoeffizienten α realisieren.

Die Definition des Wärmeübergangskoeffizienten α ist sinnvoll, da er sich für viele Anwendungen aus empirisch ermittelten Korrelationen ableiten lässt. Diese Korrelationen entstehen durch Aufbereitung von Messwerten. Dabei werden sie meist, durch die Berücksichtigung von Ähnlichkeitsgesetzen, dimensionslos dargestellt. Der Wärmeübergangskoeffizient α in dimensionsloser Form wird durch die Nusselt-Zahl Nu (Gl. (3)) beschrieben. Dabei ist L eine charakteristische Weglänge des Wärmeübergangsproblems und λ die Wärmeleitfähigkeit des Fluids.

$$Nu = \frac{\alpha * L}{\lambda} \quad (3)$$

Es gibt zwei Arten der Konvektion, bei denen sich die Nusselt-Korrelationen grundlegend unterscheiden. Man spricht von erzwungener Konvektion, wenn die Strömung des Fluids durch äußere Kräfte bedingt wird, beispielsweise durch Ventilatoren oder Pumpen. Bei freier Konvektion hingegen wird die Bewegung des Fluids durch innere Kräfte hervorgerufen. Temperaturunterschiede führen zu Dichteunterschieden innerhalb des Fluids, wodurch sich die Auftriebskräfte im Schwerfeld der Erde ändern und es zu einer Fluidbewegung an der Wand kommt. Bei erzwungener Konvektion hängt die Wärmestromdichte \dot{q}_{Kon} maßgeblich von dem Strömungszustand des Fluids ab. Dieser ist durch die Reynolds-Zahl Re charakterisiert. Die Reynolds-Zahl Re ergibt sich durch den Zusammenhang zwischen charakteristischer Strömungsgeschwindigkeit w , charakteristischer Weglänge des Wärmeübergangsproblems L und der kinematischen Viskosität ν des Fluids gemäß Gl. (4).

$$Re = \frac{w * L}{\nu} \quad (4)$$

Bei freier Konvektion weicht die Strömungscharakteristik grundlegend von den Verhältnisse bei erzwungener Konvektion ab. Die Strömungsverhältnisse bei freier Konvektion werden durch die Rayleigh-Zahl Ra repräsentiert. Diese ist nach Gl. (5) abhängig von der charakteristischen Weglänge des Wärmeübergangsproblems L , der Erdbeschleunigung g , dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten β bei der Referenztemperatur ϑ_{ref} (s. Gl. (6)), der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Wand- und Fluidtemperatur fernab der Wand, der kinematischen Viskosität ν und der Temperaturleitfähigkeit a des Fluids.

$$Ra = \frac{L^3 * g * \beta * \Delta T}{\nu * a} \quad (5)$$

$$\vartheta_{ref} = \frac{\vartheta_W + \vartheta_F}{2} \quad (6)$$

Durch Ähnlichkeitsbetrachtungen ergibt sich eine weitere Abhängigkeit des konvektiven Wärmeübergangs, die dimensionslose Prandtl-Zahl Pr . Der Zusammenhang ist nach Gl. (7) durch das Verhältnis von kinematischer Viskosität ν und Temperaturleitfähigkeit a des Fluids definiert. Einflussgrößen für die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit a sind die Wärmeleitfähigkeit λ , die Dichte ρ sowie die spezifische Wärmekapazität c_p des Fluids.

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (7)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho * c_p} \quad (8)$$

Mit den eingeführten dimensionslosen Kenngrößen lässt sich nun die Nusselt-Zahl Nu , also der dimensionslose Wärmeübergangskoeffizient bestimmen. Bei erzwungener Konvektion ist die Nusselt-Zahl Nu eine Funktion der Reynolds-Zahl Re und der Prandtl-Zahl Pr (s. Gl. (9)), bei freier Konvektion wird die Reynolds-Zahl Re mit der Rayleigh-Zahl Ra substituiert (s. Gl. (10)).

$$Nu_{erzwungen} = f(Re, Pr) \quad (9)$$

$$Nu_{frei} = f(Ra, Pr) \quad (10)$$

2.2.3 Wärmestrahlung

Jeder Körper, dessen Temperatur mehr als 0 K beträgt, emittiert Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung. Diese Strahlung wird als Wärmestrahlung bezeichnet und ist umso größer, je höher die Temperatur des Körpers ist. Im Gegensatz zu den Energietransportmechanismen Wärmeleitung und Konvektion, ist der Wärmetransport durch Wärmestrahlung von einem Körper auf einen anderen nicht an ein Medium gebunden. Das liegt daran, dass sich elektromagnetische Wellen auch im Vakuum ausbreiten können. Die maximale, von der Oberfläche eines Körpers mit der absoluten Temperatur T ausgehende, Energiestromdichte \dot{e}_R durch Strahlung ergibt sich gemäß Gl. (11). Dabei ist k eine Konstante, die nach ihren Entdeckern Stefan-Boltzmann-Konstante genannt wird.

$$\dot{e}_R = k * T^4 \quad (11)$$

Körper, auf die Gl. (11) zutrifft, werden als sogenannte schwarze Körper bezeichnet. Die Energiestromdichte \dot{e}_R ist äquivalent zur Wärmestromdichte \dot{q} . Bei realen Körpern gleicher Temperatur ist die emittierte Wärmestrahlung jedoch geringer. Die Energiestromdichte \dot{e} bei realen Körpern wird durch den sog. Emissionsgrad ε beeinflusst. Der Zusammenhang wird mit Gl. (12) beschrieben. Dabei gilt für reale Körper $0 \leq \varepsilon < 1$. Der Emissionsgrad ε ist von Material und Oberflächenbeschaffenheit abhängig.

$$\dot{e} = \varepsilon * \dot{e}_s = \varepsilon * k * T^4 \quad (12)$$

Bei der Betrachtung zweier schwarzer Körper, die sich gegenüberstehen wird deutlich, dass ein Energietransport durch Wärmestrahlung von einem Körper auf den jeweils anderen stattfindet. Die Energiestromdichte \dot{e}_s auf der Oberfläche eines Körpers, deren Flächennormale auf den anderen

Körper zeigt, ist die Bilanz der ausgetauschten Energieströme (s. Gl. (13)). Handelt es sich um zwei graue Körper mit unterschiedlichen Emissionsgraden ε_1 und ε_2 , entspricht der Zusammenhang Gl. (14). Dabei ist C_{12} die Strahlungsaustauschzahl. Diese ist gemäß Gl. (15) definiert.

$$\dot{e}_s = k * (T_1^4 - T_2^4) \quad (13)$$

$$\dot{e} = C_{12} * (T_1^4 - T_2^4) \quad (14)$$

$$C_{12} = \frac{k}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (15)$$

3 Konzeption, Konstruktion und Berechnung

Dieses Kapitel widmet sich der detaillierten Auslegung der mechanischen Komponenten der Versuchsvorrichtung. Die thermische Auslegung wird anschließend in Kapitel 4 vorgenommen. Das grundlegende Konzept der Versuchsvorrichtung wurde in der bereits erwähnten Arbeit herausgearbeitet [6]. Es handelt sich um eine Ringscherzelle, die durch Wärmestrahlung erhitzt wird.

Die Konstruktion der Bodeneinheit, der Lagerung der Antriebswelle und der Kopplung an den bereits am Institut vorhandenen Getriebemotor erfolgte bereits [6]. Abbildung 8 zeigt die komplette Baugruppe. In diesem Kapitel erfolgt die Entwicklung des Deckels der Scherzelle, der die Schnittstelle zur vorhandenen Konstruktion bildet. Weiterhin werden Verdreh-Sicherung und Entlastungsvorrichtung konstruiert.

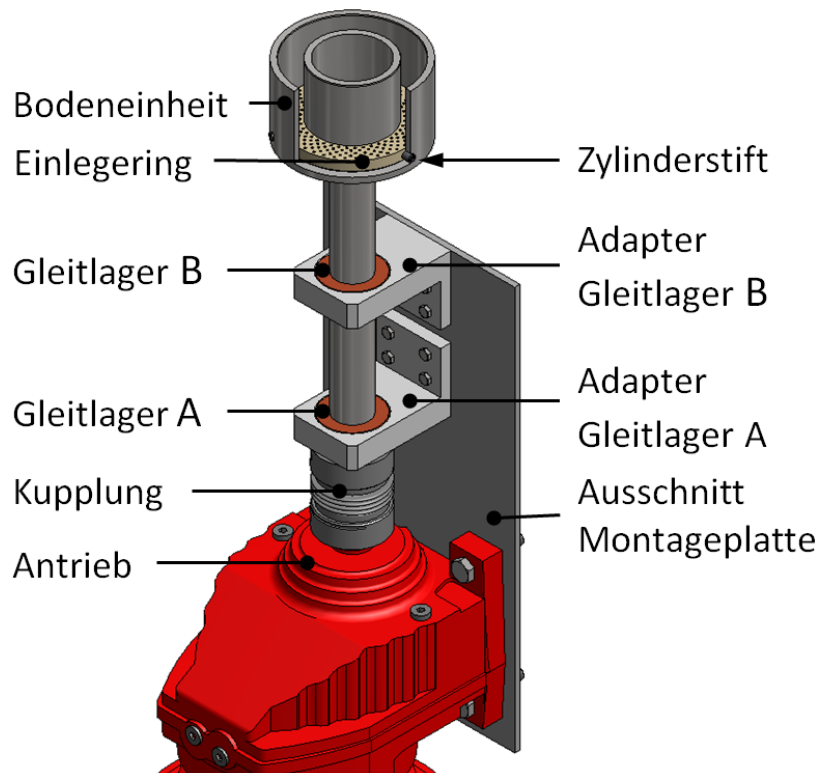


Abbildung 8 Bodengruppe mit Lagerung und Antrieb [6]

Grundlage des effektiven, zielführenden Konstruierens ist ein methodisches Vorgehen. Die VDI-Richtlinie 2221 beschreibt hierfür eine Vorgehensweise, wonach die Konstruktion in vier Phasen eingeteilt wird, die systematisch nacheinander abgearbeitet werden. Es folgt eine Auflistung der Phasen mit den jeweiligen Tätigkeitsschritten nach Theumert et al. [10].

- Analysieren
 - Erstellung einer Anforderungsliste
 - Abstrahierung des zu entwickelnden Systems als Black-Box-Darstellung
 - Funktionsanalyse, d. h. Gliederung des Gesamtsystems in unabhängige Subsysteme

- Konzipieren
 - Bildung von Lösungsvarianten zu den Subsystemen mittels Ideenfindungsmethoden
 - Entwicklung eines Morphologischen Kastens zum Kombinieren der Einzellösungen
 - Bewertung der Varianten mittels Nutzwertanalyse, oder anderer Verfahren, und Festlegung des endgültigen Konzepts
- Entwerfen
 - Entwickeln von Skizzen der endgültigen Lösung
 - Überschlägige Berechnungen zur Festlegung der Bauteildimensionierungen
- Ausarbeiten
 - Durchführung aller notwendigen Berechnungen
 - Erstellung der technischen Dokumentation (Zeichnungssatz, Stücklisten etc.)

In den Unterkapiteln 3.1 bis 3.3 folgt die Beschreibung der Anwendung der VDI 2221 auf die Konstruktion der Scherzelle.

3.1 Analysieren

Es folgt die Beschreibung des Umsetzens der ersten Phase der Konstruktion nach Theumert [10]. Dafür wird zunächst das Gesamtsystem betrachtet. Es besteht aus dem Deckel der Scherzelle mit Verdreh-Sicherung und Entlastung, Dämmung, Heizung und Regelung. In den darauf folgenden Schritten werden die einzelnen Subsysteme genauer untersucht. Als erstes wird eine allgemeine Anforderungsliste erstellt.

3.1.1 Anforderungsliste

Da die Anforderungen an die Versuchsvorrichtung im Vergleich zu der vorangegangenen Arbeit [6] weitestgehend unverändert sind, stimmen die Anforderungslisten in vielen Punkten überein.

Tabelle 1 Anforderungsliste

Z,F,W	Nr.	Beschreibung Forderung (F), Wunsch (W), Ziel (Z)	Beschreibung, Quantifizierung
1. Geometrie			
F	1.1	Deckel passt in den Boden	Probenraum: $D_a = 100 \text{ mm}$, $D_i = 65 \text{ mm}$ Ringspalt zwischen Deckel und Boden mindestens $0,1 \text{ mm}$ auf beiden Seiten
F	1.2	Fluchtende, vertikale Anordnung der Bauteile → Vermeidung eines Verkantens	Exzentrizität $< 0,1 \text{ mm}$
2. Kinematik			
F	2.1	Boden rotiert, Deckel gegen Verdrehen gesichert → Verdreh-Sicherung	$n_{max} = 40 \text{ min}^{-1}$ $M_{max} = 10,5 \text{ Nm}$
3. Kräfte			
F	3.1	Die Konstruktion kann alle auftretenden Kräfte sicher aufnehmen	$M_{max} = 10,5 \text{ Nm}$ (Torsion), Flächenpressung

F	3.2	Maximale Druckbelastung auf die Partikel $p_{max} = 1200 \frac{N}{m^2}$ → Entlastungsvorrichtung	Druckbelastung einstellbar von $0 \frac{N}{m^2}$ bis $1200 \frac{N}{m^2}$
F	3.3	Verhinderung des Gleitens der Partikel an der Berührfläche zum Deckel	Formschluss des Deckels mit oberster Partikelschicht durch raue Oberfläche
4. Energie			
F	4.1	Teststand temperaturfest	bis 500 °C
W	4.2	Teststand temperaturfest	bis 1000 °C
F	4.3	verschiedene Temperaturen einstellbar	Raumtemperatur bis 500 °C
W	4.4	verschiedene Temperaturen einstellbar	Raumtemperatur bis 900 °C
W	4.5	Wärmedämmung	Temperatur außen < 60 °C Auslegungskriterien: Kosten, Größe
F	4.6	Heizvorrichtung	Strahlungsheizer
F	4.7	Aufheizzeit	< 2 h (auf minimale Proben temperatur 850 °C)
W	4.8	Aufheizzeit	< 1 h (auf minimale Proben temperatur 850 °C)
F	4.9	Befestigung und Anschluss der Heizelemente außerhalb der Dämmung → Durchführung durch die Dämmung	Temperatur an der Anschlussstelle der Heizelemente < 500 °C
F	4.10	Erzeugung der Partikelbewegung: Antrieb elektrisch	Antriebsleistung 0,11 kW Drehmoment 10,5 Nm
5. Stoff			
F	5.1	Füllen und Entleeren des Probenraums	Partikelmenge max. 400 g
F	5.2	Verschleißbestimmung über Massenverlust	Waage notwendig: Messbereich 400 g, Messgenauigkeit 1 mg
F	5.3	kein Massenverlust an Umgebung (Messgenauigkeit)	kein Massenverlust
F	5.4	Einsatz von Partikeln mit verschiedenen Durchmessern	1 mm, 1,3mm (0,5 mm oder 1,8 mm)
F	5.5	Einsatz von Partikeln verschiedener Lieferanten	Carbo / Saint Gobain
6. Signal			
F	6.1	Temperaturmessung der Partikelprobe → Einstellung der Proben temperatur	Thermoelemente im Deckel integriert
F	6.2	Temperaturmessung der beheizten Zone der Heizelemente	Thermoelemente in Heizelementen
F	6.3	Temperaturmessung der Anschlussstelle der Heizelemente	Thermoelemente an der Anschlussstelle
F	6.3	Messung der Motordrehzahl	Einstellbar von 5 bis 40 min ⁻¹
F	6.4	Signalverarbeitung von Ein- und Ausgangssignalen (analog oder digital) z.B. der Thermoelemente, der Motordrehzahl, von Endschaltern	Nutzung vorhandener Infrastruktur (mobiler Messplatz), Steuerung mit LabView-Programm

W	6.5	Automatischer Beginn der Versuchsdurchführung bei Erreichen der Prüftemperatur der Partikel	Eingangssignal Thermoelemente Partikelmasse oder Zeitschaltung
7. Sicherheit			
F	7.1	Gefährdungsbeurteilung	Mögliche Gefahren bei Benutzung des Prüfstandes auflisten und Sicherheitsvorschriften definieren
F	7.2	Berührungsschutz der heißen/beweglichen Teile	Umhausung oder Warnhinweis
F	7.3	Brandschutz	Einhaltung der betrieblichen und gesetzlichen Vorschriften
F	7.4	Abschalten der Heizelemente bei Überhitzen	Bei $\vartheta = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
8. Ergonomie			
W	8.1	Bedienung möglichst zentral über eine Steuereinheit (Ein/Aus, Drehzahl, Start, Messung)	Zentraler Messplatz
F	8.2	einfache Be- und Entladung	Beladung von Oben, Be- und Endlageposition des Deckels
9. Fertigung			
W	9.1	Standartkomponenten/-halbzeuge verwenden	- z.B. Normteile - Fertigerzeugnisse: z.B. Form- und Stabstahl, Hohlprofile, Bleche
10. Kontrolle/Messtechnik			
F	10.1	Waage Partikelgewicht	Messbereich 400 g , Messgenauigkeit 1 mg
F	10.2	Bestimmung der Korngrößenverteilung vor und nach des Verschleißversuches	Siebmaschine/Siebe
F	10.3	Temperaturmesstechnik	Thermoelemente bis $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
11. Montage			
F	11.1	Aufbau der Scherzelle auf einer Trägerkonstruktion	Einfache Montage, flexibel, ohne Schweißen (z.Bsp. mit ITEM®-Profilen)
F	11.1	Bedienungsanleitung für den Teststand	Messablauf, Bedienung der Steuerung
F	11.2	Montagedokumentation	Bilder (Ablauf), Komplikationen
W	11.3	Auflistung möglicher Änderungen bei Montage	Dokumentation in Zeichnungen, Schaltplänen etc.
12. Transport			
W	12.1	Flexibilität	Auf Rollen montiert
13. Gebrauch			
F	13.1	Einsatzort	Labor
W	13.2	Langzeitversuch/Dauerbetrieb	Einhaltung Vorschriften
14. Instandhaltung			
W	14.1	wartungsfreundliche Konstruktion	- möglichst wenig Verschleißteile - gute Zugänglichkeit der Verschleißteile - geringe Anzahl an Komponenten

W	14.2	Reinigung	gute Zugänglichkeit zu reinigender Komponenten
15. Recycling			
F	15.1	Umwelt	keine Verwendung umweltgefährdender Stoffe
F	15.2	Mensch	keine Verwendung gesundheitsgefährdender Stoffe
16. Kosten			
F	16.1	Investitionsvolumen	möglichst gering
W	16.2	wenn möglich Verwendung vorhandener Ressourcen	z.B. Stirnradgetriebemotor, ITEM®-Profile, Frequenzumrichter, Waage, Siebmaschine

3.1.2 Black-Box-Darstellung

Als nächstes folgt die Black-Box-Darstellung. Diese Darstellung dient dazu, das Gesamtsystem zu abstrahieren und dadurch unvoreingenommen betrachten zu können. Das soll zur Entwicklung eigenständiger Lösungen führen. Als Emission werden dabei alle denkbaren, vom System ausgehenden, negativen Einflüsse auf die Umgebung definiert, die bei der Konstruktion zu berücksichtigen sind. Unter Immissionen werden alle denkbaren, von der Umwelt ausgehenden, Einflüsse auf das System verstanden. Dazu gehören Normen und gesetzliche Vorschriften. Als Input gelten sämtliche Faktoren, die von außen in das System gelangen, sie werden unterteilt in Stoff, Energie und Information. Analog verhält es sich beim Output [10]. In Abbildung 9 ist die Black-Box-Darstellung für die Scherzelle zu sehen.

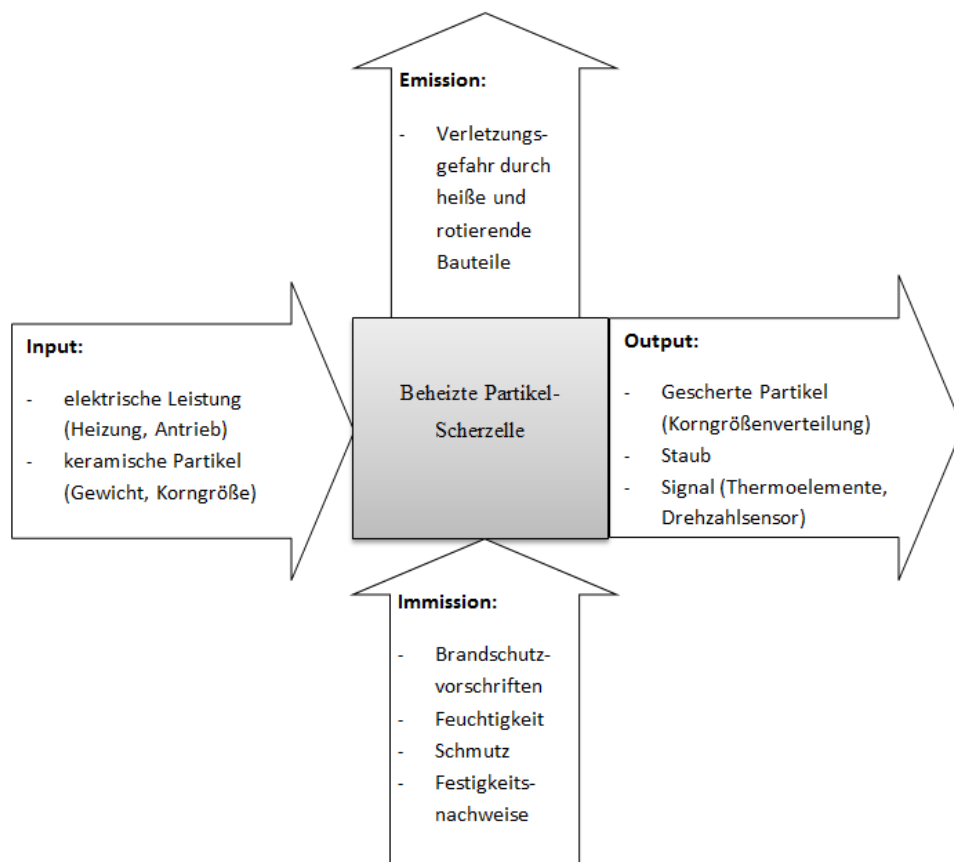


Abbildung 9 Black-Box-Darstellung nach Theumert [10].

3.1.3 Funktionsanalyse

Das Gesamtsystem muss unterschiedliche Funktionen erfüllen. Zur Ermittlung dieser einzelnen Funktionen wird eine Funktionsanalyse durchgeführt. Diese dient der Unterteilung des Gesamtsystems in überschaubare Subsysteme und erleichtert die Ideenfindung. Die Funktionsanalyse soll möglichst allgemein gehalten werden, um eventuelle Lösungsvorschläge nicht schon von vornherein zu unterdrücken. Die entwickelten Lösungsvarianten werden in einer späteren Phase wieder zusammengeführt (s. Tabelle 3).

Tabelle 2 Funktionsanalyse nach Theumert [10]

Nr.	Handhabungs- und Bearbeitungsschritte	Einzelfunktion
01	Aufsetzen des Deckels	Zentrierung des Deckels
02	Verdrehen des Deckels im Betrieb verhindern und vertikale Beweglichkeit erhalten	Verdreh-Sicherung
03	Aufbringung unterschiedlicher Lasten auf die Partikelprobe	Entlastungsvorrichtung
04	Wärmedämmung und Zugang zur Scherzelle ermöglichen	Dämmung
05	Aufheizen der Partikelprobe	Heizung
06	Einstellen unterschiedlicher Temperaturen	Regelung der Heizung
07	Befüllen und Entleeren des Probenraums	Handhabung der Partikelprobe
08	Wiegen der Partikelprobe vor und nach dem Versuch	Messung des Abriebs

3.2 Konzipieren

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über die Ergebnisse der Ideenfindungsphase vermittelt. Die in Kapitel 3.1.3 definierten Teilfunktion werden einzeln betrachtet und die Realisierungsmöglichkeiten anschließend in einem morphologischen Kasten dargestellt. Daraufhin folgt eine Nutzwertanalyse der Lösungsvorschläge mit dem Ziel, die optimale Variante zu finden.

3.2.1 Bildung von Lösungsvarianten

Zuerst wird der Deckel der Scherzelle betrachtet. Dieser bildet die Schnittstelle zu der bereits vorhandenen Konstruktion und ist somit nicht frei definierbar. Die Formgebung muss zu der des Bodens passen. Abbildung 10 zeigt, wie der Deckel (rot eingefärbt) in den Ringspalt eintaucht, in dem sich auch die Partikelprobe befindet. Da die Bodeneinheit gegen den Deckel rotiert, ist ein gewisses Spiel zwischen den Bauteilen notwendig (laut Anforderungsliste mindestens $0,1\text{ mm}$). Dieses Spiel muss jedoch kleiner als der kleinste Partikeldurchmesser sein, da sich sonst einzelne Partikel in dem Spalt verklemmen können. Die Skizzen in diesem Kapitel dienen lediglich der Veranschaulichung.

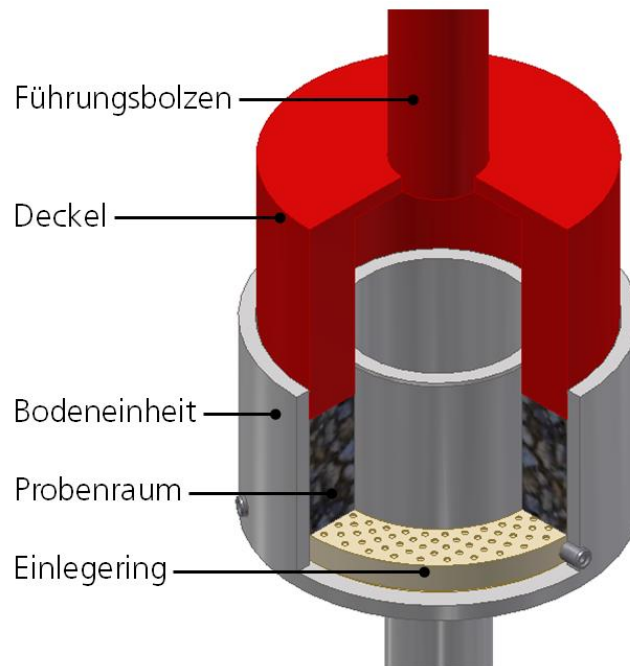


Abbildung 10 Zentrierung des Deckels

3.2.1.1 Deckel

Die Verdreh-Sicherung des Deckels soll laut Anforderungsliste außerhalb der Dämmung angebracht werden. Deshalb muss ein Wellenansatz vom Deckel durch die Dämmung nach außen geführt werden. Dieser wird im Folgenden als Führungsbolzen bezeichnet. Zur Verringerung der Wärmeverluste durch den Führungsbolzen, wird er als Hohlwelle ausgeführt. Dadurch verkleinert sich die Querschnittsfläche und somit der Energieverlust durch Wärmeleitung. Dieses Vorgehen wurde auch bei der Bodeneinheit angewandt und sorgt für die thermische Entkopplung der Wellenansätze. Abbildung 11 zeigt eine mögliche Ausführung, bei der Deckel und Führungsbolzen als ein Teil hergestellt werden.

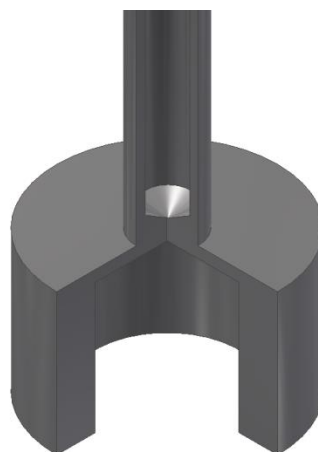


Abbildung 11 Deckel und Führungsbolzen als ein Teil

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Führungsbolzen vom Deckel zu trennen und die beiden Teile auf verschiedene Art und Weise miteinander zu verbinden. In Abbildung 12 sind zwei Varianten dieser Lösungsmöglichkeit dargestellt. Bei der Ausführung, die in Abbildung 12 a) zu sehen ist, werden die beiden Komponenten mit Hilfe einer Durchschraubverbindung zusammengefügt. Dabei

kann auf Normteile zurückgegriffen werden. Abbildung 12 b) zeigt eine Version, bei der der Deckel mit einem Gewindezapfen hergestellt wird. Der Führungsbolzen muss dafür entsprechend mit einem Innengewinde versehen werden.

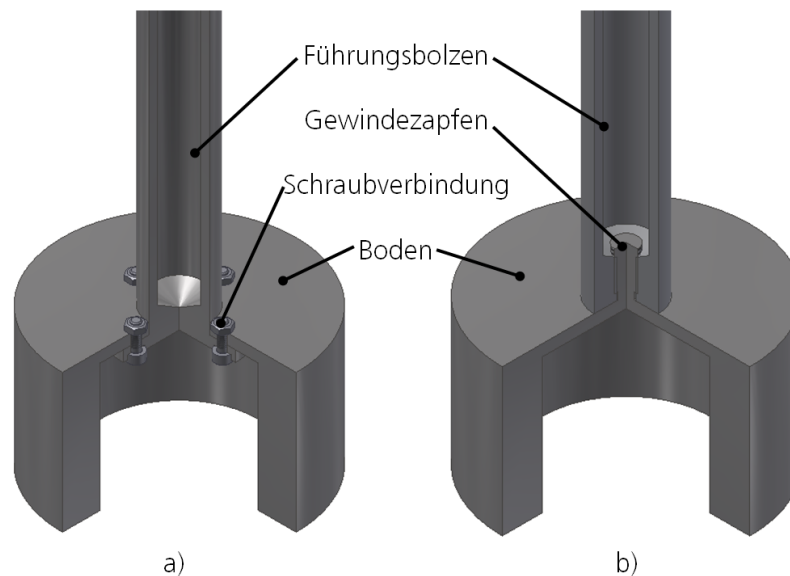


Abbildung 12 Deckel und Führungsbolzen zweiteilig

3.2.1.2 Verdreh-Sicherung

Die Verdreh-Sicherung wird an dem Führungsbolzen außerhalb der Dämmung angebracht. Sie muss das Drehmoment aufnehmen, das durch Reibung zwischen den Partikeln von der Bodeneinheit auf den Deckel übertragen wird. Eine weitere Anforderung ist, dass der Deckel in vertikaler Richtung beweglich bleibt. Eine Möglichkeit der Realisierung ist die kraft- bzw. stoffschlüssige Verbindung des Führungsbolzens mit einem Querträger. Die Aufnahme des Drehmoments und die vertikale Beweglichkeit werden durch Linearführungen an den Enden des Querträgers ermöglicht. Abbildung 13 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser Variante. Da die Zentrierung des Deckels zur Bodeneinheit nicht von der Verdreh-Sicherung geleistet werden muss, ist dieses Prinzip auch mit einer einseitigen Linearführung denkbar (s. Abbildung 14).

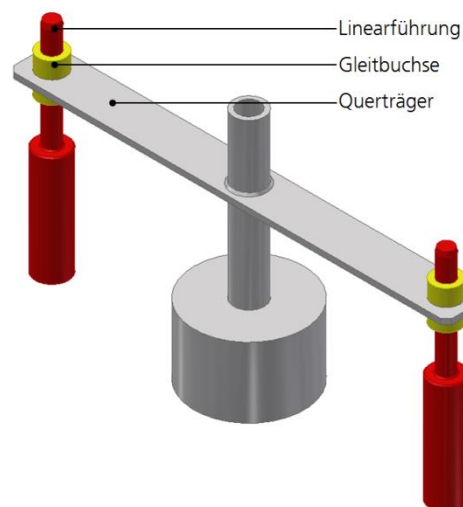


Abbildung 13 Querträger mit Führungsbolzen verbunden, zweiseitige Linearführung

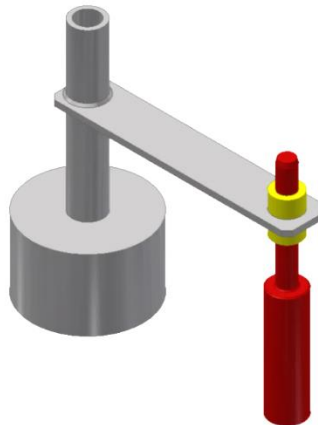


Abbildung 14 Querträger mit Führungsbolzen verbunden, einseitige Linearführung

Der Querträger kann auch als an den Enden fest eingespannt verwirklicht werden. Als Verbindung kann beispielsweise eine Standard-Einschraubverbindung zum Einsatz kommen. Führungsbolzen und Querträger müssen dann allerdings so geformt sein, dass ein Formschluss zwischen den beiden Elementen entsteht. Dieser kommt zum Beispiel durch die Ausführung des Führungsbolzens als Vierkant zustande (s. Abbildung 15). In vertikaler Richtung ist die Bewegung des Führungsbolzens durch die Reibung zwischen den Metalloberflächen erschwert. Das gilt in gleicher Weise für die anderen Varianten.

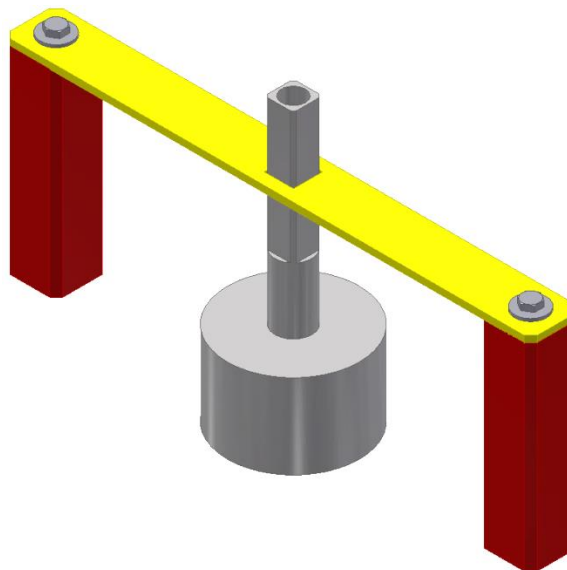


Abbildung 15 Formschluss zwischen Führungsbolzen und Querträger

3.2.1.3 Entlastung

Als nächstes werden die Realisierungsmöglichkeiten für die mechanische Entlastung des Deckels vorgestellt. Diese wird benötigt, da der Druck auf die Partikel laut Anforderungsliste variabel sein muss. Dadurch sollen die mechanischen Belastungen auf die Partikel im Receiver, sowie im Speicher nachgestellt werden. Die erste Variante ist in Abbildung 16 dargestellt. Dabei wird der Deckel mit einem (Stahl-)Seil verbunden, das über zwei Umlenkrollen geführt wird. Ein Gegengewicht am anderen Ende des Seils sorgt für die Entlastung des Deckels. Die Umlenkrollen sind an einer Trägerkonstruktion befestigt.

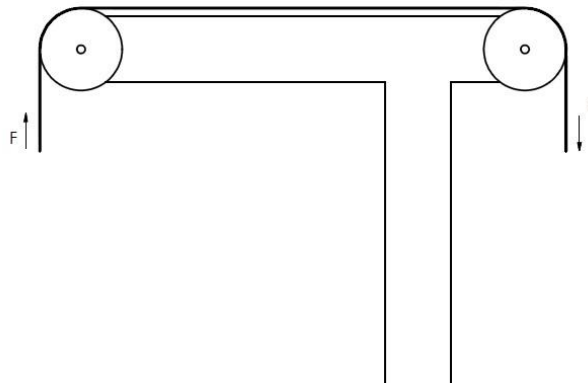


Abbildung 16 mechanische Entlastung mit Seilzug

Eine weitere Möglichkeit ist, die Entlastung mit einem verschiebbaren Gegengewicht mit der Masse m und einem Hebelarm zu realisieren. Abbildung 17 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Der Deckel wird über ein Seil oder eine Stange mit dem einen Ende des Hebels verbunden. Auf der anderen Seite des Hebels befindet sich ein Gegengewicht, dessen Position auf dem Hebel variabel ist. Wird der Abstand s_1 des Gewichtes vom Drehpunkt des Hebels vergrößert, so vergrößert sich auch die entlastende Wirkung F_2 auf den Deckel der Scherzelle. Bei Verkleinerung des Abstandes verringert sich die Entlastung entsprechend.

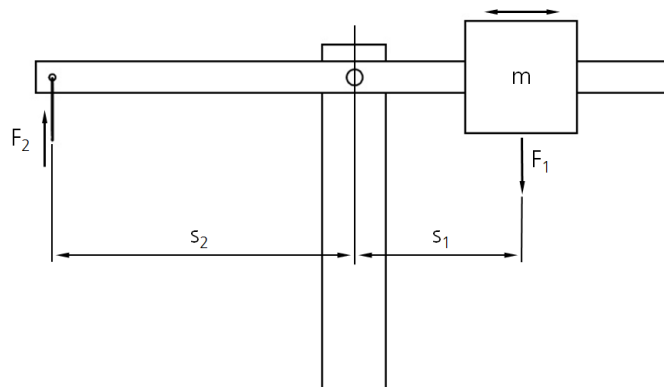


Abbildung 17 Entlastung mit verschiebbarem Gegengewicht

Die Entlastung kann auch mit einem Hebelarm realisiert werden, der an einer Trägerkonstruktion montiert ist. Ein Ende des Hebels ist wieder über ein Seil oder eine Stange mit der Scherzelle verbunden. Am anderen Ende wird eine Aufnahme für verschiedene Gegengewichte befestigt (s. Abbildung 18). Nun kann durch das Anbringen unterschiedlich schwerer Gegengewichte die Stärke der Entlastung bestimmt werden.

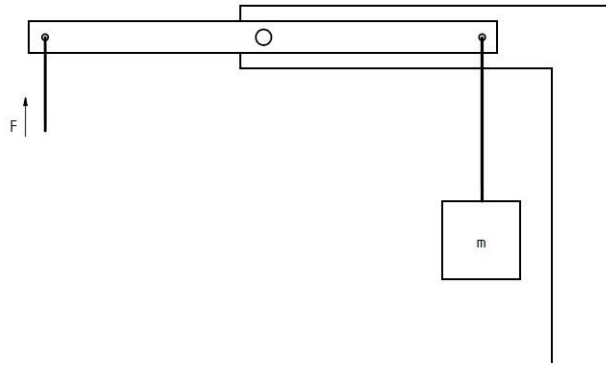
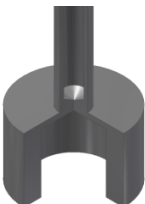
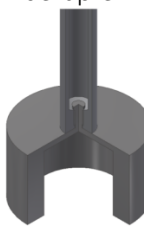
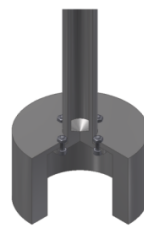
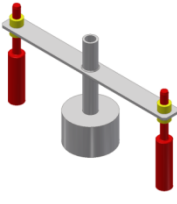

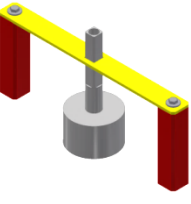

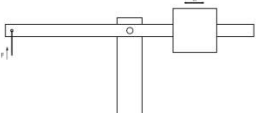
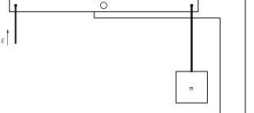


Abbildung 18 Entlastung mit Hebel und Gegengewichten

3.2.2 Morphologischer Kasten

Die in Kapitel 3.2.1 entwickelten Lösungsmöglichkeiten für die Einzelfunktionen werden zur besseren Übersichtlichkeit in einem morphologischen Kasten aufgelistet. Dieser bietet die Möglichkeit, die einzelnen Realisierungsmöglichkeiten zu verschiedenen Lösungsvarianten für das Gesamtsystem zu kombinieren. Dabei werden die Kombinationen durch eine Vorauswahl auf sinnvolle Varianten reduziert.

Tabelle 3 morphologischer Kasten

<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="text-align: center; margin-right: 10px;"> <div style="border-bottom: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="border-left: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border-bottom: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Varianten</div> </div> </div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Variante A</div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Variante B</div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Variante C</div>
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="text-align: center; margin-right: 10px;"> <div style="border-bottom: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="border-left: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border-bottom: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Einzelfunktionen</div> </div> </div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">ein Teil</div> <div style="text-align: center;">  </div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">zweiteilig, Deckel mit Gewindezapfen</div> <div style="text-align: center;">  </div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">zweiteilig, mit Normteilen</div> <div style="text-align: center;">  </div>
<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Verdreh-Sicherung</div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Querträger mit Linearführung</div> <div style="text-align: center;">  </div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Querträger mit Linearführung einseitig</div> <div style="text-align: center;">  </div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Querträger mit Formschluss</div> <div style="text-align: center;">  </div>
<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Entlastungsvorrichtung</div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Umlenkung über Rollen</div> <div style="text-align: center;">  </div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Verschiebbares Gewicht</div> <div style="text-align: center;">  </div>	<div style="border-bottom: 1px solid black; width: 100%; height: 10px; margin: 0 auto;"></div> <div style="text-align: center;">Variable Gegengewichte</div> <div style="text-align: center;">  </div>

3.2.3 Nutzwertanalyse

Zur Auswahl der besten Lösungsvariante werden die in Kapitel 3.2.2 entworfenen Vorschläge einer Nutzwertanalyse unterzogen. Diese führt unter den gegebenen Bedingungen zur optimalen Lösung. Als Kriterien gelten hierbei meistens Kostenfaktor und Funktionalität, es können jedoch auch anwenderspezifische Bewertungskriterien mit einfließen. Die hier durchgeführte Nutzwertanalyse entspricht der VDI-Richtlinie 2225 [10]. Dabei werden die Kosten einfach und die Funktionalität zweifach gewichtet. Für die Lösungsmöglichkeiten der verschiedenen Varianten werden Punkte gemäß Tabelle 4 vergeben und anschließend aufsummiert. Die Variante mit der höchsten Punktzahl entspricht dem bestmöglichen Konzept.

Tabelle 4 Nutzwertanalyse nach VDI 2225

				Nutzwertanalyse				Blatt: 1 von: 1				
Wertskala nach VDI 2225 mit Punktvergabe P von 0 bis 4:												
0 = unbefriedigend, 1 = gerade noch tragbar, 2 = ausreichend, 3 = gut, 4 = sehr gut												
Einzelfunktionen	Variante A K= Kosten 1-fach F= Funktion 2-fach W=Wertzahl	K	F	W=K + F	Variante B K= Kosten 1-fach F= Funktion 2-fach W= Wertzahl	K	F	W=K + F	Variante C K= Kosten 1-fach F= Funktion 2-fach W=Wertzahl	K	F	W=K + F
01	Deckel und Füh- rungsbolzen eintei- lig	1	4	9	Zweiteilig, Deckel mit Gewindezapfen	2	3	8	Zweiteilig, Verbin- dung mit Normtei- len	3	4	11
02	Querträger mit Linearführung	2	4	10	Querträger mit Linearführung ein- seitig	3	3	9	Querträger mit Formschluss	3	4	11
03	Umlenkung über Rollen	3	4	11	Verschiebbares Gewicht	2	3	8	Variable Gegengewichte	4	4	12
	Punktzahl Pges	30			Punktzahl Pges	25			Punktzahl Pges	34		

3.2.3.1 Anmerkungen zur Nutzwertanalyse

Der Unterschied zwischen den Lösungsvarianten für die Deckel-Führungsbolzen Kombination besteht in erster Linie in den Herstellungskosten. Bei Variante A muss von beiden Seiten Material abgedreht werden, was zu einem Umspannen des Bauteils in der Maschine führt. Dadurch entstehen Einbußen bei den Fertigungstoleranzen. Bei Variante B muss der Deckel ebenso von beiden Seiten bearbeitet werden. Durch den Gewindezapfen ist die Zentrierung des Führungsbolzens zum Deckel nicht optimal und es ist nur eine Drehrichtung des Motors möglich. Variante C stellt keine besonderen Anforderungen an die Beschaffenheit der Oberseite des Deckels, die Zentrierung erfolgt durch eine Passung an der Bohrung.

Die Bewertung der Kosten der Lösungsmöglichkeiten für die Verdreh-Sicherung entsteht durch Betrachtung des Herstellungsaufwandes. Bei Variante A müssen zwei Gleitlager hergestellt werden. Die Anfertigung der dafür notwendigen Passungssysteme ist aufwändig und entsprechend teuer.

Bei den Varianten B und C wird jeweils nur ein Passungssystem benötigt. Die Funktionalität der Möglichkeiten A und C wird als gleichwertig bewertet. Durch die einseitige Lagerung der Variante B entsteht ein zusätzlicher Freiheitsgrad und ein Verkanten des Deckels im Boden wird erleichtert. Die Unterschiede bei den Trägerkonstruktionen der Lösungsmöglichkeiten für die Entlastung sind gering. Es sollen am Institut vorhandene ITEM®-Profile verwendet werden. Der größte Kostenfaktor bei Variante A ist die Befestigung und Lagerung der zwei Laufrollen an der Trägerkonstruktion. Für Variante C wird nur eine Lagerung benötigt. Als Gegengewichte können beliebige Gewichte eingesetzt werden. Das verschiebbare Gewicht bei Variante B ist in der Auslegung und Herstellung aufwändiger. Außerdem wird hier eine Kraftmessung benötigt um die Stärke der Entlastung zu bestimmen.

3.3 Entwerfen und Berechnen

Nach Festlegung der Lösungsvariante kann damit begonnen werden, detailliertere Entwürfe zu erstellen. Dabei werden für jeden Entwurf überschlägige Festigkeitsberechnungen angestellt. Entspricht das Ergebnis nicht der Anforderung, muss eine neue Version entworfen und die Berechnungen erneut durchgeführt werden. Somit wird die Lösung iterativ immer mehr dem Optimum angenähert. Um die Anzahl der Iterationen gering zu halten, erfolgt die Konstruktion von „innen nach außen“. Das heißt, dass die Bauteile zuerst entworfen und berechnet werden, von denen die anderen Teile abhängig sind. Der Deckel steht am Anfang der Konstruktion, darauf folgt die Entwicklung des Führungsbolzens. Dabei muss die Schraubverbindung mit dem Deckel und die Geometrie für den Formschluss der Verdreh-Sicherung ausgelegt werden. Anschließend wird dazu passend der Querträger entworfen, der die Verdreh-Sicherung komplettiert. Die Bodeneinheit der Scherzelle wurde auf eine Betriebstemperatur von 500 °C ausgelegt [6]. Dementsprechend gilt diese Auslegungstemperatur auch bei den in dieser Arbeit konstruierten Komponenten. Abgeschlossen wird die Konstruktion mit dem Entwurf der Entlastungsvorrichtung. Die Berechnungen erfolgen anhand des Vorgehens in Roloff/Matek [11]. Die detaillierten technischen Zeichnungen der Bauteile befinden sich in Anhang 10.1 dieser Arbeit.

3.3.1 Schraubverbindung Deckel-Führungsbolzen

Die erste Auslegung für die Verbindung des Deckels mit dem Führungsbolzen sieht eine Schraubverbindung mit vier Schrauben vor. Für den Festigkeitsnachweis sind zunächst die auftretenden Belastungen zu bestimmen. Anschließend erfolgt die detaillierte Schraubenberechnung nach Roloff/Matek [11].

3.3.1.1 Schraubenbelastung

Die Schraubverbindung muss das Motordrehmoment M_{mot} aufnehmen können, das über Reibung in der Partikelprobe vom Motor auf den Deckel übertragen wird. Der Führungsbolzen wird gegen Rotation gesichert, somit wirkt auf die Verbindung eine Querkraft $F_{Q,ges}$. Diese ist abhängig vom Motormoment M_{mot} und dem Lochkreisdurchmesser d_{LK} . Dieser wird aufgrund des vorhandenen Bauraumes zu $D_L = 40 \text{ mm}$ gewählt. Der Zusammenhang wird durch Gl. (16) beschrieben.

$$F_{Q,ges} = \frac{2 * M_{mot}}{d_{LK}} \quad (16)$$

Für vorliegenden Fall:

Bemessungs-Drehmoment M_{mot} [Nmm] (laut Aufgabenstellung)	20000
Lochkreisdurchmesser D_L [mm]	40
Querkraft $F_{Q,ges}$ [N]	1000

Anhand der Art und Größe der Schraubenbelastung kann jetzt eine Vorauswahl des notwendigen Schraubendurchmessers erfolgen. Dabei wird nach sog. Festigkeitsklassen unterschieden, die Streckgrenze und Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffes angeben. Die Festigkeitseigenschaften von Metallen ändern sich jedoch mit zunehmender Temperatur erheblich, deshalb gelten die Festigkeitsklassen bei der Betriebstemperatur der Scherzelle nicht mehr. Es müssen spezielle hitzebeständige Werkstoffe verwendet werden und der Festigkeitsnachweis ist spezifisch dafür zu führen.

3.3.1.2 Klemmkraft

Um eine ungünstige Scherbelastung der Schrauben zu vermeiden, soll die Querkraft $F_{Q,ges}$ ausschließlich über die Reibung zwischen den verspannten Flächen übertragen werden. Damit sich die aufeinander liegenden Bauteile nicht gegeneinander verschieben können, muss der Reibschluss stets stärker als die Querkraft $F_{Q,ges}$ sein. Der Reibschluss entsteht durch Anziehen der Schrauben, wodurch eine Längskraft entlang der Schraubenachse verursacht wird. Diese ist äquivalent zur Klemmkraft F_{Kl} . Die pro Schraube erforderliche Klemmkraft F_{Kl} zur Übertragung der Kraft $F_{Q,ges}$ ist abhängig von der Reibungszahl μ in der Trennfuge zwischen den Bauteilen und der Anzahl z der Schrauben. Die Abhängigkeiten lassen sich mit Gl. (17) beschreiben.

$$F_{Kl} = \frac{F_{Q,ges}}{\mu * z} \quad (17)$$

Für vorliegenden Fall:

Querkraft $F_{Q,ges}$ [N]	1000
Reibungszahl μ [-] (Stahl auf Stahl, Tabellenwert Roloff/Matek)	0,5
Anzahl z [-] der Schrauben	4
Klemmkraft F_{Kl} [N]	500

3.3.1.3 Setzverhalten der Schraubverbindung

Die Klemmkraft F_{Kl} wird über die relative kleine Auflagefläche des Schraubenkopfes bzw. der Mutter übertragen. Infolge dessen kommt es an diesen Stellen zu Kriechvorgängen im Werkstoff, wobei sich Oberflächenunebenheiten durch plastische Verformungen glätten. Man spricht von einem Setzen der Schraubverbindung. Durch das Setzen kommt es zu einem Vorspannungskraftverlust F_Z . Wird dieser zu groß, ist die Verbindung gefährdet, da die Klemmkraft F_{Kl} nicht mehr ausreicht um den Reibschluss zu gewährleisten. Der Vorspannungskraftverlust F_Z ist, neben den plastischen Verformungen, von der elastischen Nachgiebigkeit der Schrauben δ_s , sowie der verspannten Le δ_T abhängig.

3.3.1.4 Schraubennachgiebigkeit

Die Ermittlung der elastischen Schraubennachgiebigkeit δ_S erfolgt durch Addition der Nachgiebigkeiten des Schraubenkopfes δ_K , des eingeschraubten Gewindes δ_G , der Mutter δ_M und der Schaftabschnitte δ_i (s. Gl.(18)). Abbildung 19 stellt die Einteilung der Schraube beispielhaft anhand einer Dehnschraube dar.

$$\delta_S = \delta_K + \delta_i + \delta_{i+1} + \dots + \delta_G + \delta_M \quad (18)$$

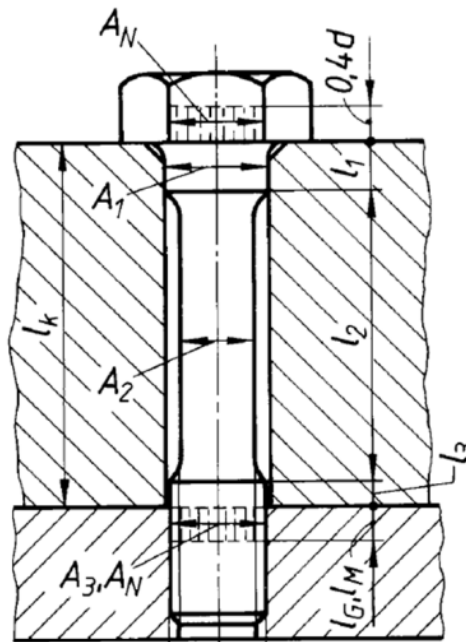


Abbildung 19 Teilabschnitte zur Bestimmung der Schraubennachgiebigkeit [11]

Gl. (19) beschreibt die Berechnung der einzelnen Nachgiebigkeiten und deren Verknüpfung zur Schraubennachgiebigkeit δ_S . Die Nachgiebigkeit ist abhängig von der Länge l_i des betrachteten Schraubenteils, dessen Querschnitt A_i und dem Elastizitätsmodul E_S des Schraubenwerkstoffs. Zur Berechnung der Nachgiebigkeit von Schraubenkopf δ_K , eingeschraubtem Gewinde δ_G und Mutter δ_M wird die Länge l_i durch sogenannte Ersatzzylinder mit der Länge $l_K = l_M = 0,4 * d_N$ und $l_G = 0,5 * d_N$ dargestellt. Dabei ist d_N der Nenndurchmesser der Schraube. Die Nennquerschnittsfläche A_N ergibt sich aus dem Nenndurchmesser d_N , die Querschnittsflächen A_1 und A_2 werden aus dem jeweiligen Durchmesser d_1 bzw. d_2 berechnet und die Kernquerschnittsfläche A_3 folgt aus dem Kerndurchmesser des Gewindes (vgl. Gl. (20)).

$$\delta_S = \frac{1}{E_S} \left(\frac{0,4 * d_N}{A_N} + \frac{l_1}{A_1} + \frac{l_2}{A_2} + \dots + \frac{0,5 * d_N}{A_3} + \frac{0,4 * d_N}{A_N} \right) \quad (19)$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} * d_i^2 \quad (20)$$

3.3.1.5 Nachgiebigkeit der verspannten Bauteile

In dem hier betrachteten Fall ist die Querausdehnung D_A der verspannten Teile größer als der Durchmesser der Schraubenkopfaufgabe d_w . Somit verteilt sich die Pressung in den Bauteilen und es

entsteht eine druckbeanspruchte Zone, wie sie in Abbildung 20 schematisch dargestellt ist. Der entstehende Druckkörper kann mit einem virtuellen Hohlzylinder mit der Ersatzquerschnittsfläche A_{ers} angenähert werden.

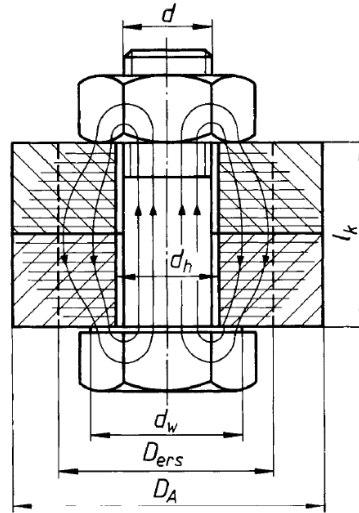


Abbildung 20 Druckbeanspruchte Zone in verspannten Bauteilen [11]

Neben der Querausdehnung D_A und dem Durchmesser der Schraubenkopfauflage d_w sind der Durchmesser des Durchgangslochs d_h sowie die Klemmlänge l_k der verspannten Teile Einflussgrößen bei der Berechnung der Ersatzquerschnittsfläche A_{ers} . Für den Fall $d_w \leq D_A \leq d_w + l_k$ gelten die Gleichungen (21) und (22). Falls die Querausdehnung $D_A > d_w + l_k$ wird, gilt die Grenzbedingung $D_A = d_w + l_k$. Der Grund dafür ist, dass die Ersatzquerschnittsfläche A_{ers} mit zunehmender Ausdehnung der verspannten Bauteile annähernd konstant bleibt. Die elastische Nachgiebigkeit δ_T entspricht gemäß Gl. (23) dem Zusammenhang zwischen Klemmlänge l_k , Ersatzquerschnittsfläche A_{ers} und Elastizitätsmodul E_T der verspannten Bauteile.

$$A_{ers} = \frac{\pi}{4} * (d_w^2 - d_h^2) + \frac{\pi}{8} * d_w * (D_A - d_w) * [(x + 1)^2 - 1] \quad (21)$$

mit

$$x = \sqrt[3]{\frac{l_k * d_w}{D_A^2}} \quad (22)$$

$$\delta_T = \frac{l_k}{A_{ers} * E_T} \quad (23)$$

3.3.1.6 Vorspannkraftverlust

Mit den Nachgiebigkeiten δ_S und δ_T der Schrauben bzw. verspannten Bauteilen kann der Vorspannkraftverlust F_Z bestimmt werden. Dieser ist zudem abhängig von einem Setzbetrag f_Z , der wiederum abhängig ist von der Anzahl der Trennfugen und der Beschaffenheit der Bauteiloberflächen. Der Standardwert liegt nach Roloff/Matek bei $f_Z = 0,011 \text{ mm}$ [11]. Die Berechnung des Vorspannkraftverlustes F_Z erfolgt anhand Gl. (24).

$$F_Z = \frac{f_Z}{\delta_S + \delta_T} \quad (24)$$

3.3.1.7 Montagevorspannkraft

Bei der Montage der Schraubverbindung muss darauf geachtet werden, dass die erforderliche Klemmkraft F_{Kl} auch noch nach Setzen der Verbindung besteht. Deshalb ist der Vorspannkraftverlust F_Z zu kompensieren. Die Montagevorspannkraft F_{VM} ist daher die Summe aus Klemmkraft F_{Kl} und Vorspannkraftverlust F_Z . Je nach Anziehverfahren unterliegt der Wert der Montagevorspannkraft F_{VM} einer gewissen Streuung, die in Gl. (25) durch den Anziehungsfaktor k_A berücksichtigt wird. Für das Anziehen mit einem Drehmomentschlüssel gilt beispielsweise ein Anziehungsfaktor $k_A = 2$. Die Werte können aus Tabellen entnommen werden.

$$F_{VM} = k_A \cdot (F_{Kl} + F_Z) \quad (25)$$

Die Montagevorspannkraft F_{VM} ist die betragsmäßig größte Belastung der Schraube und somit der für die Auswahl der Schraube relevante Wert. Die erste Auslegung sieht eine Schraubverbindung mit vier M4-Zylinderkopfschrauben mit Gewinde bis Kopf vor, die aus einem hitzebeständigen Werkstoff bestehen müssen. Die Wahl fällt auf den hochwarmfesten Chrom- Stahl mit Molybdänzusatz und der Bezeichnung 1.4923 [12] (Datenblatt s. Anhang 10.3, Abbildung 93). Dieser zeichnet sich durch seine Zunderbeständigkeit bis 600°C aus und ist ein gängiger Werkstoff für hochwarmfeste Schrauben. Für die verspannten Bauteile kommt nach der vorangegangenen Arbeit [6] der Werkstoff 1.4404 [13] (Datenblatt s. Anhang 10.3, Abbildung 94) zum Einsatz. Der größte Teil des Setzens der Schraubverbindung geschieht direkt bei der Montage, die bei Raumtemperatur stattfindet. Somit erfolgt der Festigkeitsnachweis zunächst bei dieser Temperatur. Die Montagevorspannkraft F_{VM} berechnet sich für diese Konfiguration zu:

Elastizitätsmodul der Schraube $E_S(20^\circ\text{C}) \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	200000
Schraubennennendurchmesser $d_N [\text{mm}]$	4,00
Nennquerschnittsfläche $A_N [\text{mm}^2]$	12,6
Gewindekernquerschnittsfläche $A_3 [\text{mm}^2]$	7,75
Freie Gewindelänge $l_1 [\text{mm}]$	7,0
Schraubennachgiebigkeit $\delta_S \left[\frac{\text{mm}}{\text{N}} \right]$	$7,08 \cdot 10^{-6}$
Durchmesser Schraubenkopfauflage $d_w [\text{mm}]$	7,0
Durchmesser des Durchgangslochs $d_h [\text{mm}]$	4,5
Klemmlänge $l_k [\text{mm}]$	7,0
Querausdehnung $D_A [\text{mm}]$	14,0
Ersatzquerschnittsfläche $A_{ers} [\text{mm}^2]$	54,5
Elastizitätsmodul $E_T(20^\circ\text{C}) \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	200000
Nachgiebigkeit $\delta_T \left[\frac{\text{mm}}{\text{N}} \right]$	$6,43 \cdot 10^{-7}$
Setzbetrag $f_Z [\text{mm}]$	0,011
Vorspannkraftverlust $F_Z [\text{N}]$	1424
Anziehungsfaktor $k_A [-]$	2
Klemmkraft $F_{Kl} [\text{N}]$	500
Montagevorspannkraft $F_{VM} [\text{N}]$	3848

Schraubenspannkraft

Als nächstes wird die Kraft berechnet, die die Schraube bei Ausnutzung von 90 % der Streckgrenze $R_{p0,2}$ des Schraubenwerkstoffes ertragen kann. Beim Anziehen erfährt die Schraube neben der Montagezugbelastung σ_M eine Torsionsbelastung τ_t und es entsteht somit ein zweiachsiger Spannungszustand. Dieser kann mit Hilfe der Gestaltänderungsenergie-Hypothese gemäß Gl. (26) in einen gleichwertigen einachsigen Spannungszustand umgewandelt werden.

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3 * \tau_t^2} = 0,9 * R_{p0,2} \quad (26)$$

Die Montagezugspannung σ_M wird durch die Montagevorspannkraft F_{VM} hervorgerufen und ist abhängig von der Streckgrenze $R_{p0,2}$ des Werkstoffes, dem zum Spannungsquerschnitt gehörenden Durchmesser d_s , der Gewindesteigung P , dem Gewidereibwert μ_G und dem d_2 (Tabellenwert) der Schraube. Der Zusammenhang wird durch Gl. (27) beschrieben. Die Bestimmung des Spannungsdurchmessers d_s erfolgt mit Gl. (28), wobei d_3 den Kerndurchmesser des Gewindes darstellt. Dieser ist genormt und kann dementsprechend aus Tabellen abgelesen werden. Die Torsionsspannung τ_t entspricht dem Quotienten aus Gewindemoment M_G und Torsionswiderstandsmoment W_t (s. Gl. (29), (30) und (31))

$$\sigma_M = \frac{0,9 * R_{p0,2}}{\sqrt{1 + 3 * \left[\frac{3}{d_s} * (0,159 * P + 0,577 * \mu_G * d_2) \right]^2}} \quad (27)$$

$$\text{mit} \quad d_s = \frac{(d_2 + d_3)}{2} \quad (28)$$

$$\tau_t = \frac{M_G}{W_t} \quad (29)$$

$$M_G = F_{VM} * (0,159 * P + 0,577 * \mu_G * d_2) \quad (30)$$

$$W_t = \frac{\pi}{12} * d_3^3 \quad (31)$$

Die Schraubenspannkraft F_{Sp} (bzw. die Montagevorspannkraft F_{VM90}) bei der 90 % der Streckgrenze $R_{p0,2}$ ausgenutzt werden) wird nach Gl. (32) durch Multiplikation der Montagezugspannung σ_M mit dem Spannungsquerschnitt A_s berechnet.

$$F_{Sp} = F_{VM90} = \sigma_M * A_s = \sigma_M * \frac{\pi}{4} * \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \quad (32)$$

Die Berechnung der Schraubenspannkraft F_{Sp} erfolgt zunächst wieder bei Raumtemperatur. Im nächsten Schritt wird davon ausgegangen, dass der Vorspannkraftverlust F_Z durch das Setzen der Schraubverbindung vollständig eingetreten ist. Im Betrieb der Scherzelle bei der Auslegungstemperatur $\vartheta_A = 500 \text{ °C}$ wirkt somit ausschließlich die Klemmkraft F_{KI} .

Streckgrenze $R_{p0,2}(20 \text{ °C}) \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	600
Gewindeflankendurchmesser $d_2 [mm]$	3,55
Gewindekerndurchmesser $d_3 [mm]$	3,14

Spannungsdurchmesser d_s [mm]	3,34
Gewindesteigung P [–]	0,7
Gewindereibwert μ_G [–]	0,12
Montagezugspannung $\sigma_M(20\text{ °C}) \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	466
Schraubenspannkraft $F_{Sp}(20\text{ °C})$ [N]	4083
Montagevorspannkraft F_{VM} [N]	3848

Bei Raumtemperatur ist der Festigkeitsnachweis somit erbracht. Im Datenblatt des Schraubenwerkstoffs ist ein Diagramm enthalten, in dem die Streckgrenze $R_{p0,2}$ über der Temperatur aufgetragen ist. Der bei der Auslegungstemperatur ϑ_A abgelesene Wert wird unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors S (s. Gl. (33)) als Grundlage für den Festigkeitsnachweis bei erhöhter Temperatur verwendet. Die Klemmkraft F_{Kl} bewirkt innerhalb der Schraube eine Zugspannung σ_z , die abhängig ist vom Spannungsquerschnitt A_s und nach Gl. (34) berechnet wird.

$$S = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_z} \quad (33)$$

$$\sigma_z = \frac{F_{Kl}}{A_s} \quad (34)$$

Klemmkraft F_{Kl} [N]	500
Zugspannung $\sigma_z \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	57,1
Streckgrenze $R_{p0,2}(500\text{ °C}) \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	350
Sicherheitsfaktor S [–]	6,13

Der Festigkeitsnachweis der Schraubverbindung ist somit erfolgt. Durch den hohen Sicherheitsfaktor $S = 6,13$ ist anzunehmen, dass die Verbindung auch einem dauerhaften Betrieb bei 500 °C standhält.

3.3.1.8 Anziehdrehmoment

Zur Erzeugung der Montagevorspannkraft F_{VM} muss die Schraube mit einem bestimmten Anziehdrehmoment M_{AZ} angezogen werden. Dieses Drehmoment lässt sich ausreichend genau mit der durch Gl. (35) beschriebenen Beziehung berechnen. Dabei wird von einem Gewindereibwert $\mu_G \approx 0,12$ ausgegangen. Durch Einsetzen des Nenndurchmessers d_N der Schraube in der Einheit m erhält man das Ergebnis direkt mit der Einheit Nm .

$$M_{AZ} \approx 0,17 * F_{VM} * d_N \quad (35)$$

Montagevorspannkraft F_{VM} [N]	3848
Schraubennendurchmesser d [m]	0,004
Anziehdrehmoment M_A [Nm]	2,62

3.3.1.9 Flächenpressung an den Auflageflächen

Zur Komplettierung der Berechnung der Schraubverbindung werden die Auflageflächen auf Einhaltung der zulässigen Flächenpressung überprüft. Dazu genügt es, den Nachweis für den schwächeren Werkstoff zu führen. In der Regel ist das der Werkstoff der verspannten Bauteile. Die Flächenpressung fp wird durch die Kraft, die in Schraubenlängsrichtung wirkt und die Auflagefläche A_{fp} von Schraubenkopf, bzw. Mutter beeinflusst. Die Auflagefläche A_{fp} wird gemäß Gl. (36) aus dem Durchmesser der Schraubenkopf- bzw. Mutternaufgabe d_w und dem Bohrungsdurchmesser d_h gebildet. Für die Berechnung wird das Verhältnis aus maximaler Schraubenkraft $F_{S,max}$ und Auflagefläche A_{fp} gebildet (Gl. (37)). Die maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ ergibt sich gemäß Gl. (38). Der erhaltene Wert für die Flächenpressung muss kleiner als die Streckgrenze $R_{p0,2}$ des Werkstoffs sein, um größere plastische Verformungen zu verhindern.

$$A_{fp} = \frac{\pi}{4} * (d_w^2 - d_h^2) \quad (36)$$

$$fp \approx \frac{F_{S,max}}{A_{fp}} \quad (37)$$

$$F_{S,max} = \frac{F_{Sp}}{0,9} \quad (38)$$

Auflagefläche A_{fp} [mm ²]	22,6
maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ [N]	4537
Flächenpressung fp $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	201
Streckgrenze $R_{p0,2}$ (1.4404 bei 20 °C) $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	220

Damit wird auch hier die kritische Grenze nicht erreicht und die Schraubverbindung kann in dieser Form realisiert werden. Die detaillierten Konstruktionszeichnungen befinden sich in Anhang 10.1 dieser Arbeit (Abbildung 76 und Abbildung 77).

3.3.2 Verdreh-Sicherung

Für die Verdreh-Sicherung wurde ein Querträger mit Formschluss zum Führungsbolzen der Scherzelle gewählt. Die erste Version sieht die Ausführung des Führungsbolzens als Vierkant vor, der durch eine entsprechende Aussparung im Querträger geführt wird. Da der obere Teil der Scherzelle in axialer Richtung beweglich sein soll, ist an der Lagerung ein gewisses Spiel notwendig. Dieses Spiel führt zu einer Reduktion der kraftübertragenden Flächen auf Linienkontakte. Abbildung 21 verdeutlicht den Zusammenhang.

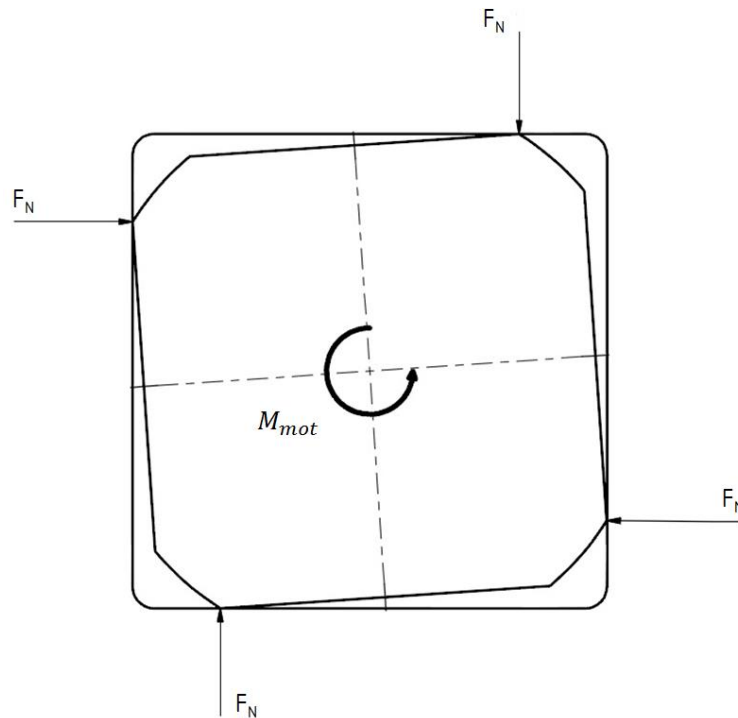


Abbildung 21 Linienkontakt bei Vierkant-Formschluss

3.3.2.1 Hertz'sche Pressung

Da Linienkontakte keine flächenmäßige Ausdehnung haben, wäre die Flächenpressung an den Berührstellen theoretisch unendlich. Da jedoch alle Werkstoffe bei Belastung eine elastische bzw. plastische Verformung erfahren, wird aus dem Linienkontakt unter Last eine rechteckige Auflagefläche, für die die Flächenpressung bestimmt werden kann. Zur Berechnung der Bauteilbelastungen in solchen Fällen kommen die Hertz'schen Gleichungen [11] zum Einsatz. Dazu wird zunächst aus den Krümmungsradien der sich berührenden Körper r_1 und r_2 der Ersatzradius r_{ers} gebildet. Dies dient der Beziehung der realen Verhältnisse auf das Berechnungsmodell Linienkontakt von zylindrischem Körper und ebener Fläche (s. Abbildung 22). Ist einer der Körper konkav gekrümmt, das heißt der Krümmungsmittelpunkt liegt außerhalb des Bauteils (s. Abbildung 23), dann geht der Radius negativ in Gl. (39) ein. Anschließend werden die Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 der Werkstoffe der sich berührenden Körper gemäß Gl. (40) zum Ersatz-Elastizitätsmodul E_{ers} zusammengefasst. Dazu werden die Querkontraktionszahlen ν_1 und ν_2 der beiden Körper benötigt. Mit der Normalkraft F_N und der Berührlänge l lässt sich daraufhin die Hertz'sche Pressung p_H mit Gl. (41) berechnen.

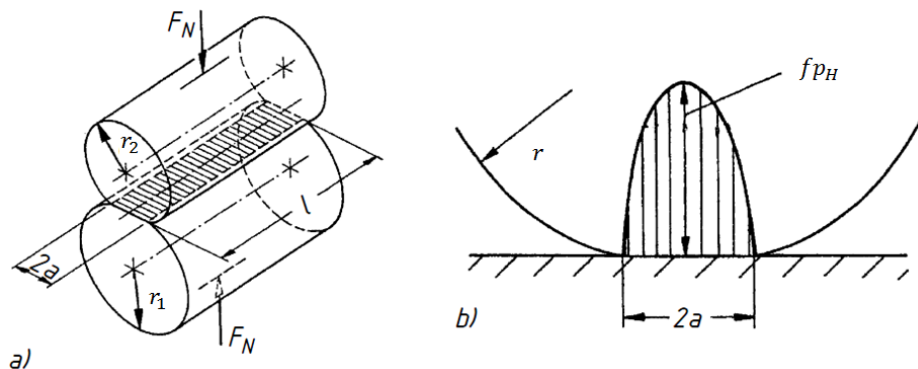


Abbildung 22 Kontaktfläche zweier sich berührender Zylinder, nach [11]

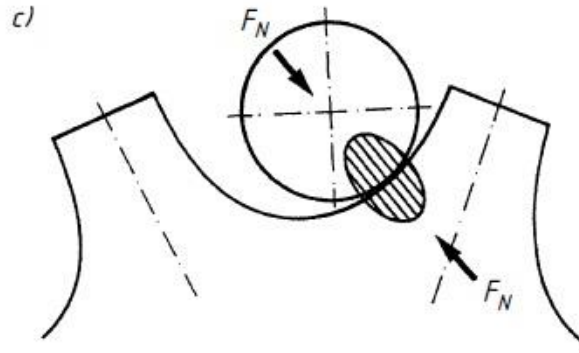


Abbildung 23 Kontakt bei konkav gekrümmtem Körper [11]

$$r_{ers} = \frac{r_1 * r_2}{(r_1 + r_2)} \quad (39)$$

$$E_{ers} = \frac{2 * E_1 * E_2}{[(1 - \nu_1^2) * E_2 + (1 - \nu_2^2) * E_1]} \quad (40)$$

$$fp_H = \sqrt{\frac{F_N * E_{ers}}{2 * \pi * r_{ers} * l}} \quad (41)$$

Abbildung 24 zeigt die Form und Abmessungen des ersten Konstruktionsentwurfes des Führungsbolzens als Vierkant ausgeführt. Die runde Welle hat einen Durchmesser von 26 mm , dementsprechend sind die Ecken des Vierkants abgerundet. Sie ist als Hohlwelle ausgeführt. Die Bohrung in der Mitte dient der Reduzierung des wärmeleitenden Querschnitts. Somit wird der Wärmeverlust über die Welle begrenzt. Die Kontaktfläche des Querträgers ist eben, somit entspricht der hier vorliegende Fall bereits dem Berechnungsmodell zylindrischer Körper auf ebener Fläche. Der Ersatzradius r_{ers} ist deshalb gleich dem Radius r_1 der abgerundeten Ecken des Vierkants. Der Hebelarm ha , der den Betrag der aus dem Drehmoment M_{mot} resultierenden Kraft F_N bestimmt, beträgt 7 mm . Zur besseren Übersichtlichkeit ist nur ein Kraftangriffspunkt dargestellt. Insgesamt sind es vier (vgl. Abbildung 21). Beide Kontaktpartner bestehen aus demselben Werkstoff (1.4404 [13]). Es wird angenommen, dass die Temperaturen der Bauteile an den Berührstellen gleich sind. Dadurch haben die Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 den gleichen Betrag. Diese Annahme bedeutet weiterhin, dass sich die thermische Ausdehnung der Bauteile in gleichem Maße verhält und die Beweglichkeit des Querträgers in axialer Richtung bestehen bleibt. Die Dicke des Querträgers entspricht der Berührlänge l . Damit kann jetzt die Hertz'sche Flächenpressung fp_H für diesen Entwurf berechnet werden.

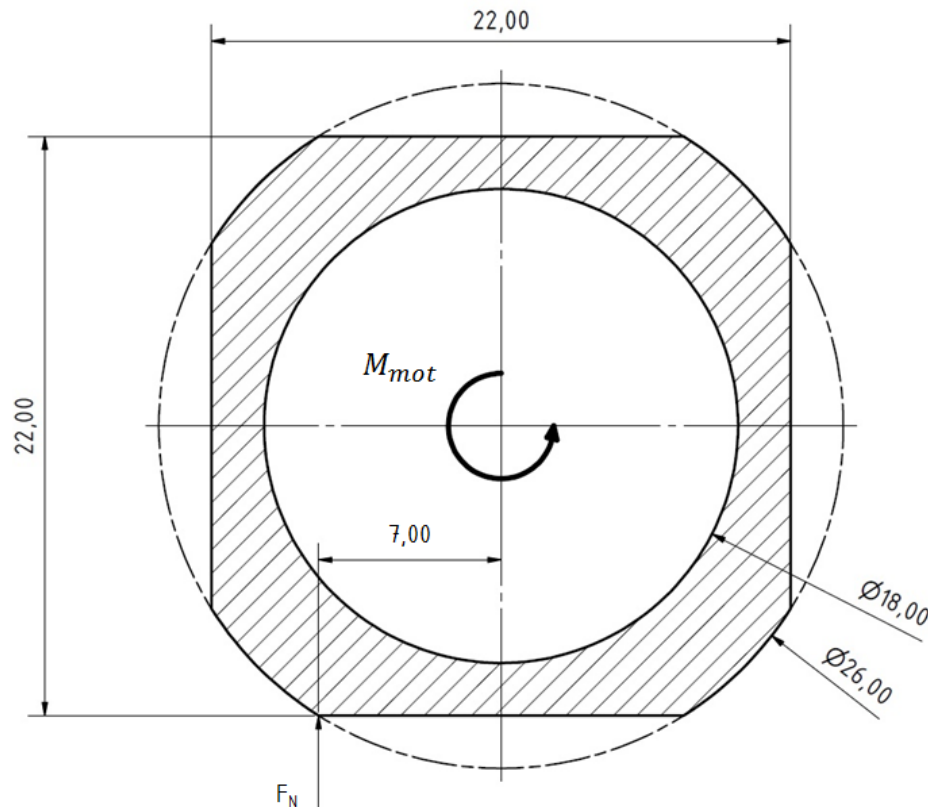


Abbildung 24 Führungsbolzen Vierkant

Bemessungs-Drehmoment M_{mot} [Nmm]	20000
Hebelarm ha [mm]	7,00
Resultierende Normalkraft $F_{N,ges}$ [N]	2857
Normalkraft pro Kontakt F_N [N]	714
Ersatzradius $r_{ers} = r_1$ [mm]	13,0
Elastizitätsmodul $E_1 = E_2$ (500 °C) $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	165000
Querkontraktionszahl $\nu_1 = \nu_2$ [–] (Standardwert Stahl)	0,3
Ersatz-Elastizitätsmodul E_{ers} $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	181319
Berührlänge l [mm]	10,0
Hertz'sche Flächenpressung fp_H $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	398
Streckgrenze $R_{p0,2}$ (1.4404 bei 500 °C) $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	100

Bei diesem Entwurf übersteigt die auftretende Flächenpressung die Streckgrenze $R_{p0,2}$ des Werkstoffs 1.4404 [13]. Das bedeutet, dass es zu größeren plastischen Verformungen kommt. Dadurch erhöht sich zwar die Größe der kraftübertragenden Flächen und die Flächenpressung sinkt entsprechend. Durch die Verformung entsteht jedoch ein Abdruck des Querträgers im Führungsbolzen. Dieser Abdruck führt zu Kanten, die die axiale Beweglichkeit des Vierkants in Relation zum Querträger behindern. Die Konstruktion muss somit überarbeitet werden. Dazu wird zunächst analysiert,

welche Parameter angepasst werden müssen. Eine Verringerung der resultierenden Normalkraft pro Kontakt F_N kann durch eine Erhöhung des Radius der Welle und der Anzahl der Kontaktflächen erfolgen. Die Belastung müsste jedoch um den Faktor 25 gesenkt werden, um die Festigkeitsbedingung zu erfüllen. Ebenso verhält es sich mit der Erhöhung der Berührlänge l . Die dritte Variationsmöglichkeit bieten die Krümmungsradien der sich berührenden Körper r_1 und r_2 . Aus der Betrachtung von Gl. (39) folgt, dass der Ersatzradius r_{ers} einen umso größeren Wert annimmt, je kleiner die Summe $r_1 + r_2$ wird. Zusammen mit der Tatsache, dass der Krümmungsradius bei konkav gekrümmten Flächen negativ in die Summe einfließt, ergibt sich der Ansatz für den nächsten Entwurf. Abbildung 25 zeigt schematisch die Geometrie der zweiten Version des Formschlusses. In dem Führungsbolzen werden vier rinnenförmige Nuten vorgesehen. In diese Rinnen greifen entsprechend geformte „Zähne“ des Querträgers.

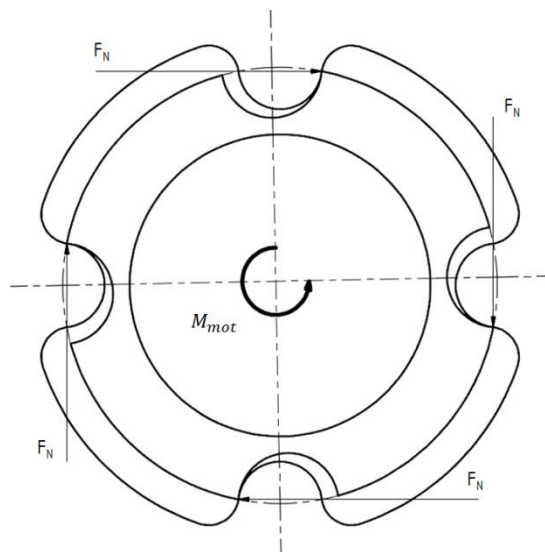


Abbildung 25 Linienkontakt bei Verzahnung

In Abbildung 26 sind die gewählten Abmessungen der Nuten und „Zähne“ zu sehen. Damit die Summe der Radien $r_1 + r_2$ möglichst klein wird, beträgt das Spiel zwischen Führungsbolzen und Querträger $\Delta r_{min} = 0,05 \text{ mm}$. Das ist der Wert, mit dem die Rechnung durchgeführt wird. Der Hebelarm ha_b entspricht bei diesem Entwurf dem Außenradius der Welle.

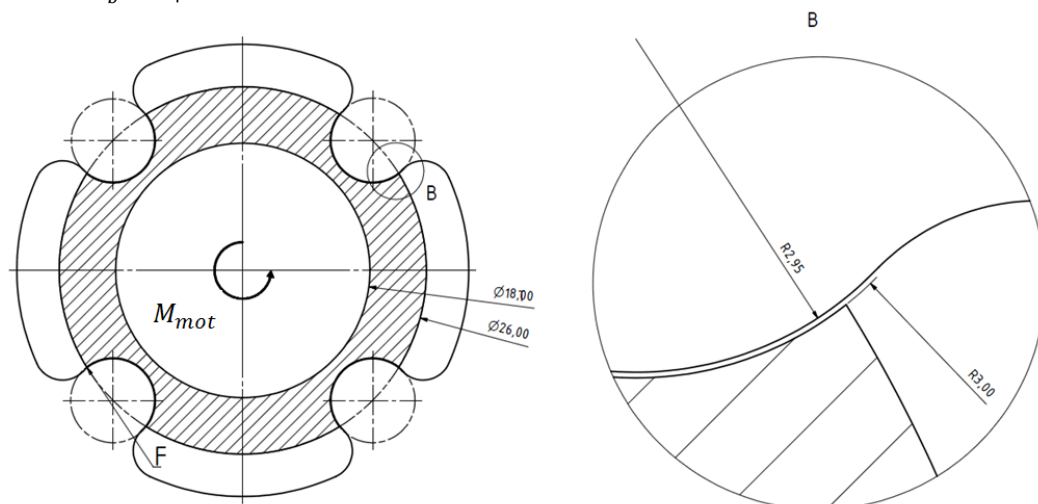


Abbildung 26 Führungsbolzen mit rinnenförmigen Nuten

Bemessungs-Drehmoment M_{mot} [Nmm]	20000
Hebelarm ha_b [mm]	13,0
Resultierende Normalkraft $F_{N,ges,b}$ [N]	1538
Normalkraft pro Kontakt $F_{N,b}$ [N]	385
Ersatzradius $r_{ers,b}$ [mm]	177
Elastizitätsmodul $E_1 = E_2$ (500 °C) $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	165000
Querkontraktionszahl $\nu_1 = \nu_2$ [–] (Standardwert Stahl)	0,3
Ersatz-Elastizitätsmodul E_{ers} $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	181319
Berührlänge l_b [mm]	10,0
Hertz'sche Flächenpressung $f p_{H,b}$ $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	79,2
Streckgrenze $R_{p0,2}$ (1.4404 bei 500 °C) $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	100

Somit steht fest, dass bei diesem Entwurf die aus dem Drehmoment M_{mot} resultierende Belastung ohne plastische Verformung ertragen wird.

3.3.2.2 Torsionsbelastung des Führungsbolzens

In Zusammenhang mit der Verdreh-Sicherung wirkt durch das Drehmoment M_{mot} des Motors eine Torsionsspannung τ_t auf den Führungsbolzen. Diese wird mit Gl. (42) berechnet und ist abhängig vom Widerstandsmoment W_t gegen Torsion, das die Geometrie des Führungsbolzens berücksichtigt. Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine Hohlwelle mit dem Innendurchmesser d_i und dem tragenden Außendurchmesser d_a . Damit ergibt sich das Widerstandsmoment W_t gemäß Gl. (43). Dabei ist zu beachten, dass der tatsächliche Außendurchmesser $d_{a,tat}$ nach Gl. (44) durch den Nutradius r_{Nut} reduziert wird (vgl. Abbildung 26).

$$\tau_t = \frac{M_{mot}}{W_t} \quad (42)$$

$$W_t = \frac{\pi}{16} * \frac{(d_a^4 - d_i^4)}{d_a} \quad (43)$$

$$d_a = d_{a,tat} - 2 * r_{Nut} \quad (44)$$

Das volle Drehmoment M_{mot} wirkt nur dann auf den Führungsbolzen, wenn keine Relativbewegung zwischen Deckel und Boden der Scherzelle mehr stattfindet, beispielsweise durch Verkanten der Bauteile. Im regulären Betrieb sind kleinere Belastungen zu erwarten. Deshalb wird, für den Fall des Verkantens, der statische Festigkeitsnachweis geführt. Die zulässige Torsionsspannung $\tau_{t,zul}$ des Werkstoffes ergibt sich nach [11] aus der Streckgrenze $R_{p0,2}$ gemäß Gl. (45). Der Sicherheitsfaktor S gegen Fließen entspricht dem Quotient aus zulässiger Torsionsspannung $\tau_{t,zul}$ und auftretender Torsionsspannung τ_t (s. Gl. (46)).

$$\tau_{t,zul} \approx 0,65 * R_{p0,2} \quad (45)$$

$$S = \frac{\tau_{t,zul}}{\tau_t} \quad (46)$$

Bemessungs-Drehmoment M_{mot} [Nmm]	20000
Außendurchmesser d_a [mm]	20,0
Widerstandsmoment gegen Torsion W_t [mm ³]	540
Torsionsspannung τ_t $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	37,0
Streckgrenze $R_{p0,2}$ (1.4404 bei 500 °C) $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	100
zulässige Torsionsspannung $\tau_{t,zul}$ $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	65,0
Sicherheitsfaktor S [–]	1,76

Nach Roloff/Matek [11] gilt die Festigkeit als ausreichend, wenn der Sicherheitsfaktor S einen Wert zwischen 1,2 und 1,8 annimmt. Das ist bei der hier gewählten Auslegung der Fall, so dass zum nächsten Schritt übergegangen werden kann. Es handelt sich um den Festigkeitsnachweis des Querträgers der Verdreh-Sicherung.

3.3.2.3 Biegebelastung des Querträgers

Ebenso wie die Torsionsbelastung τ_t des Führungsbolzens wird eine Biegebelastung σ_B des Querträgers verursacht. Wird ein Volumenkörper auf Biegung belastet, ergibt sich ein charakteristischer Verlauf der Biegespannung σ_B wie in Abbildung 27 zu sehen ist. In der sogenannten neutralen Faser in der Mitte des Körpers ist die Spannung gleich Null. Nach außen hin steigt die Spannung jeweils linear an, wirkt jedoch in entgegengesetzte Richtungen. Es entstehen somit eine Druckfaser und eine Zugfaser. Der Festigkeitsnachweis erfolgt für die an diesen Stellen auftretende maximale Biegespannung.

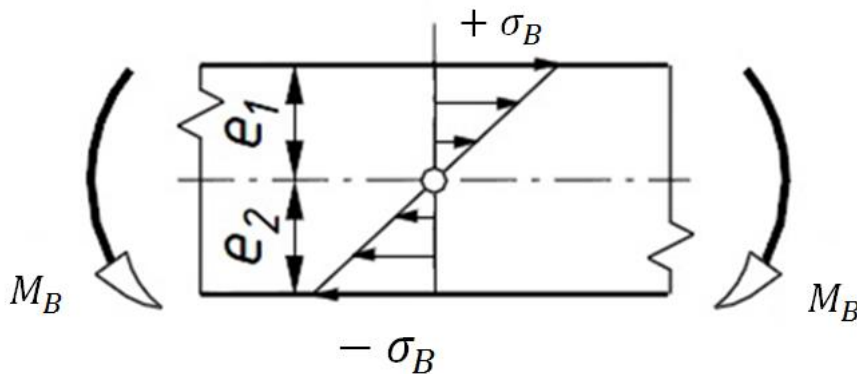


Abbildung 27 Balkenbiegung nach [11]

Abbildung 28 zeigt das Biegeverhalten des Querträgers für den betrachteten Belastungsfall. Zur besseren Veranschaulichung ist die Durchbiegung deutlich vergrößert dargestellt. Der Angriffspunkt des Motordrehmoments M_{mot} liegt äquidistant zwischen den beiden Auflagerpunkten A und B . Somit ist das Biegemoment M_B auf beiden Seiten betragsmäßig gleich, wirkt jedoch in gegensätzliche Richtungen. Dementsprechend sind die Biegeverhältnisse auf beiden Seiten spiegelbildlich zueinander.

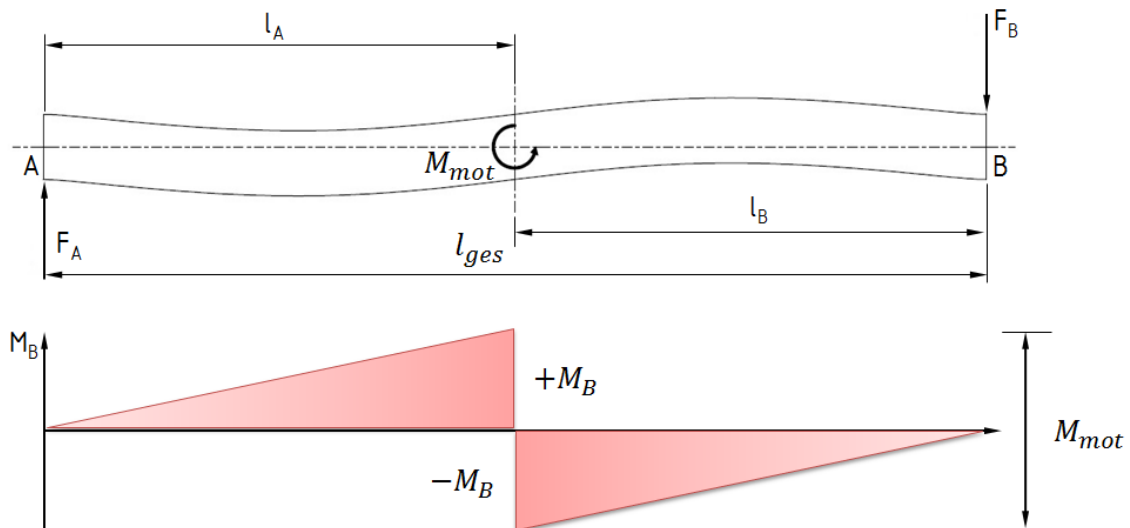


Abbildung 28 Veranschaulichung des Biegeverhaltens und Biegemomentenverlauf nach [14]

Die Biegespannung σ_B wird anhand Gl. (47) berechnet. Das Biegemoment M_B ergibt sich gemäß Gl. (48). Es ist abhängig vom Abstand l_A bzw. l_B des Angriffspunktes des Drehmoments M_{mot} von den Auflagerpunkten in Relation zur Gesamtlänge l_{ges} des Querträgers [14]. Durch das Widerstandsmoment gegen Biegung W_B wird die Geometrie des Balkens berücksichtigt. Es ergibt sich gemäß Gl. (49) aus dem Quotienten aus axialem Flächenträgheitsmoment I_a und dem Abstand e zwischen neutraler Faser und Randfaser orthogonal zur Biegeachse.

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_B} \quad (47)$$

$$M_B = \frac{l_{A/B}}{l_{ges}} * M_{mot} \quad (48)$$

$$W_B = \frac{I_a}{e} \quad (49)$$

Abbildung 29 zeigt den Schnitt durch den Querträger an der Angriffsstelle des Motordrehmoments T . Die Aussparung ist der Durchführung des Führungsbolzens geschuldet und das Biegemoment M_b wirkt somit nur in den Randbereichen. Das axiale Flächenträgheitsmoment I_a für diese Geometrie kann mit Gl. (50) berechnet werden, indem das zugehörige Trägheitsmoment der ausgesparten Fläche vom Trägheitsmoment der Gesamtfläche subtrahiert wird.

$$I_a = \frac{B * H^3}{12} - \frac{B * h^3}{12} \quad (50)$$

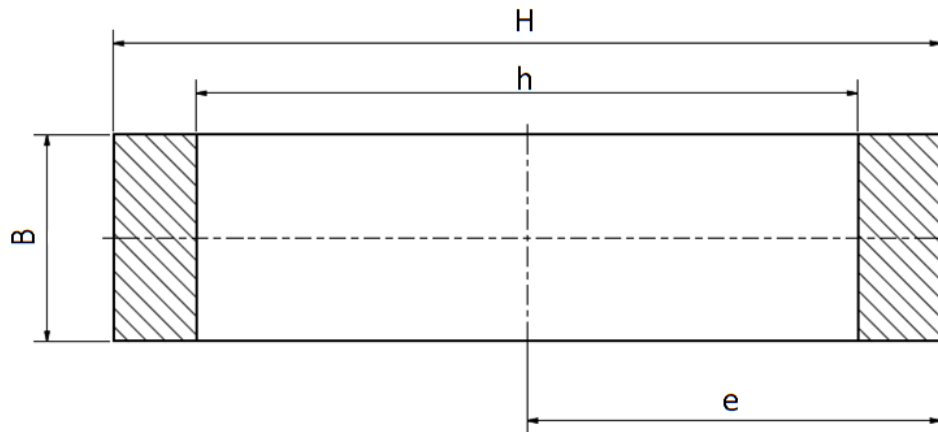


Abbildung 29 Schnittbild des Querträgers am Momentenangriffspunkt

Aufgrund des gleichen Abstands des Angriffspunkts des Motordrehmoments M_{mot} zu den Auflagern A und B nimmt das maximale Biegemoment M_B den halben Wert des Moments M_{mot} an. Nachfolgend sind die geometrischen Abmessungen des Querträgers und das Ergebnis der Berechnung für die entstehende Biegebelastung aufgeführt.

Bemessungs-Drehmoment M_{mot} [Nmm]	20000
Gesamtlänge des Querträgers l_{ges} [mm]	580
Abstand $l_A = l_B$ [mm]	290
Biegemoment M_B [Nmm]	10000
Höhe H [mm]	40,0
Höhe h [mm]	32,0
Breite B [mm]	10,0
axiales Flächenträgheitsmoment I_a [mm ⁴]	26027
Abstand zwischen neutraler Faser und Zug-/Druckfaser e [mm]	20
Widerstandsmoment gegen Biegung W_B [mm ³]	1301
Maximale Biegespannung σ_B [$\frac{N}{mm^2}$]	7,68
Streckgrenze $R_{p0,2}$ (1.4404 bei 20 °C) [$\frac{N}{mm^2}$]	≥ 200

Somit ist erwiesen, dass die auftretende Belastung mit Sicherheit ertragen werden kann. Die Auslegung für Verdreh-Sicherung des Deckels der Scherzelle ist damit abgeschlossen und der Fokus des nächsten Schrittes bezieht sich auf die Entlastungsvorrichtung.

3.3.3 Entlastungsvorrichtung

Die Entlastungsvorrichtung besteht im Wesentlichen aus einem Hebelarm, der auf der einen Seite über ein Stahlseil mit dem Führungsbolzen der Scherzelle verbunden ist und auf der anderen Seite eine Aufnahmemöglichkeit für Gegengewichte bietet. Zusätzlich bildet die Lagerung des Hebelarm-

mes ein weiteres Bauteil der Vorrichtung. Die Trägerkonstruktion soll aus ITEM®-Profilen aufgebaut werden. Abbildung 30 zeigt den Hebelarm mit den gewählten Längenverhältnissen zwischen den Kraftangriffspunkten. Daraus resultiert ein Biegemoment $M_{B,Hebel}$, dessen Verlauf ebenso abgebildet ist. Die Entlastungskraft F_E entspricht der Gewichtskraft der angehängten Gegengewichte. Dadurch entsteht an der Lagerung die Auflagerkraft F_L . Die Berechnung des Moments $M_{B,Hebel}$ erfolgt anhand der Gleichungen (47) bis (50).

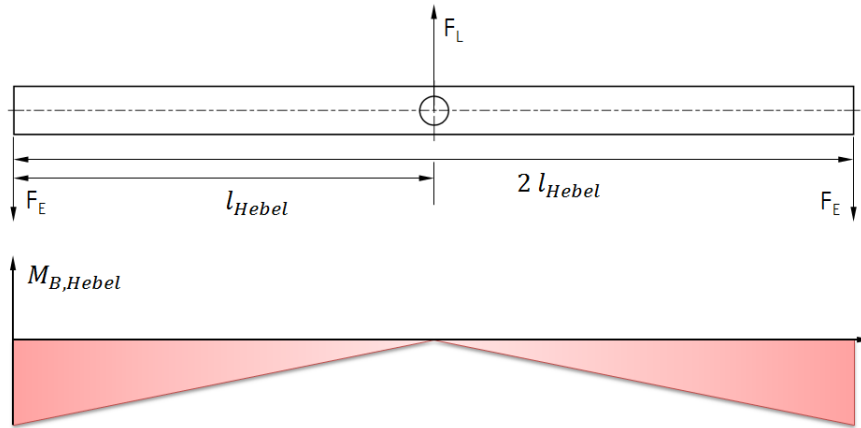


Abbildung 30 Verlauf des Biegemoments über die Länge des Hebelarms

Die maximale Entlastungskraft $F_{E,max}$ entspricht der Gewichtskraft des Deckels der Scherzelle mit dem Führungsbolzen. Diese wird anhand des mit dem CAD-Programm Autodesk® Inventor erstellten 3D-Modells bestimmt. Durch die Aufstellung des Momentengleichgewichts um den Auflagerpunkt ergibt sich das maximale Biegemoment zu $M_{B,Hebel} = l_{Hebel} * F_E$.

Entlastungskraft F_E [N]	25,0
Länge l_{Hebel} [mm]	140
Biegemoment $M_{B,Hebel}$ [Nmm]	3500
Höhe H [mm]	20,0
Höhe h [mm]	10,0
Breite B [mm]	12,0
axiales Flächenträgheitsmoment $I_{a,Hebel}$ [mm ⁴]	7000
Abstand zwischen neutraler Faser und Zug-/Druckfaser e [mm]	10,0
Widerstandsmoment gegen Biegung $W_{B,Hebel}$ [mm ³]	700
Maximale Biegespannung $\sigma_{B,Hebel}$ $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	5
Streckgrenze $R_{p0,2}$ (1.4404 bei 20 °C) $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	≥ 200

Als nächstes erfolgt die Berechnung der Biegebelastung des Lagerungsbolzens. Abbildung 31 zeigt den Lagerungsbolzen und den entsprechenden Lagersitz. Für die Berechnung kann der Bolzen als einseitig fest eingespannter Balken betrachtet werden, da innerhalb des Lagersitzes keine Biegung auftreten kann. Für die Biegespannung $\sigma_{B,Bolzen}$ gilt Gl. (47). In diesem Fall wird das Moment $M_{B,Bolzen}$ das auf den Lagerungsbolzen wirkt mit Gl. (51) berechnet. Es ergibt sich aus dem

Produkt der Lagerquerkraft $F_{Q,Bolzen}$ und dem Abstand l_{Bolzen} zwischen Lagersitz und Kraftangriffspunkt. Die Querkraft $F_{Q,Bolzen}$ besteht aus der Gewichtskraft des Hebels und der Entlastungskraft F_E , die an beiden Seiten des Hebels angreift (s. Gl. (52)). Das axiale Moment $I_{a,Bolzen}$ ist für runde Vollquerschnitte anhand Gl. (53) definiert und vom Durchmesser d_{Bolzen} des Lagerungsbolzens abhängig.

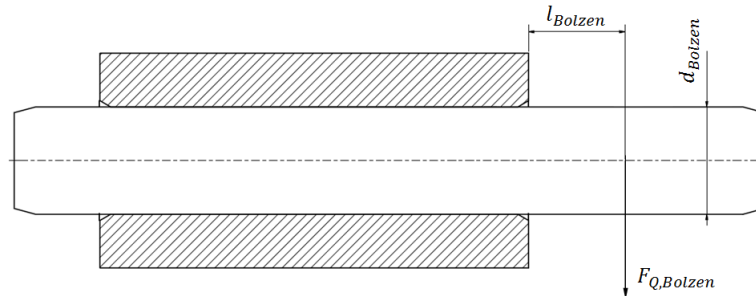


Abbildung 31 Lagerung der Entlastungsvorrichtung

$$M_{B,Bolzen} = l_{Bolzen} * F_{Q,Bolzen} \quad (51)$$

$$F_{Q,Bolzen} = m_{Hebel} * g + 2 * F_E \quad (52)$$

$$I_{a,Bolzen} = \frac{\pi}{16} * d_{Bolzen}^4 \quad (53)$$

Masse des Hebels m_{Hebel} [kg]	0,66
Lagerquerkraft $F_{Q,Bolzen}$ [N]	56,5
Abstand l_{Bolzen} [mm]	9
Biegemoment $M_{B,Bolzen}$ [Nmm]	508
Durchmesser d_{Bolzen} [mm]	10,0
axiales Flächenträgheitsmoment $I_{a,Bolzen}$ [mm ⁴]	1963
Abstand zwischen neutraler Faser und Zug-/Druckfaser e [mm]	5,0
Widerstandsmoment gegen Biegung $W_{B,Bolzen}$ [mm ³]	393
Maximale Biegespannung $\sigma_{B,Bolzen}$ $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	1,3
Streckgrenze $R_{p0,2}$ (1.4404 bei 20 °C) $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	≥ 200

4 Thermische Auslegung

Inhalt dieses Kapitels ist die Auslegung der Wärmedämmung und der Heizung der Versuchsvorrichtung. Die mechanische Auslegung der Scherzelle basiert auf einer Betriebstemperatur bis maximal $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ und erfüllt somit die Anforderung (vgl. Tabelle 1). Für weiterführende Versuche ist jedoch eine Betriebstemperatur von $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ wünschenswert. Da Heizung und Dämmung unabhängig von den mechanischen Komponenten sind, erfolgt die thermische Auslegung für eine Temperatur $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das ermöglicht eine weitere Verwendung der in diesem Kapitel ausgelegten Komponenten bei eventueller Änderung der mechanischen Bauteile.

4.1 Auslegung der Dämmung

Zum Schutz der Umgebung vor den Wärmeemissionen der Versuchsvorrichtung und zur Begrenzung der thermischen Verluste wird die Scherzelle mit einer Wärmedämmung versehen. Dafür muss zuerst ein geeignetes Dämmmaterial ausgewählt werden. Für den Temperaturbereich $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ bietet der Markt dafür unterschiedliche Dämmstoffe, deren Beschreibung in den Unterkapiteln 4.1.1 bis 4.1.3 erfolgt. Die Wahl des Dämmstoffes richtet sich nach spezifischen Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit, die mechanische Belastbarkeit, sowie die Möglichkeiten der Bearbeitung. Darüber hinaus enthalten einige Materialien gesundheitsschädliche Fasern, die nach Möglichkeit zu vermeiden sind. Generell lässt sich sagen, je höher die Porosität (Verhältnis Hohlraum- zu Gesamtvolumen) der Dämmstoffe ist, desto niedriger ist die Wärmeleitfähigkeit. Zusätzlich sinkt jedoch auch die mechanische Belastbarkeit.

4.1.1 Feuerleichtsteine

Als Feuerleichtstein werden geformte, feuerfeste Dämmstoffe bezeichnet, deren Porosität $> 45\%$ ist. Die Temperatur, bis zu der sie eingesetzt werden können, wird Klassifizierungstemperatur genannt und ist in der Norm festgelegt. Sie liegt bei mindestens $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Feuerleichtsteine lassen sich, je nach verwendeten Rohstoffen, in aluminiumsilikatische Feuerleichtsteine, Silikatleichtsteine, Zirkonleichtsteine und Korundleichtsteine einteilen. Hauptbestandteile der chemischen Zusammensetzung sind Aluminiumoxid Al_2O_3 , Siliziumdioxid SiO_2 und Calciumoxid CaO oder Magnesiumoxid MgO [15]. Mit steigender Klassifizierungstemperatur nimmt der Anteil an Al_2O_3 zu, wodurch die Dichte und die Wärmeleitfähigkeit zunehmen. Feuerleichtsteine haben relativ gute mechanische Eigenschaften und sind thermisch und chemisch stabil. In Abbildung 32 ist die Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Feuerleichtsteine über der Temperatur aufgetragen. Die Zahl nach dem „L“ in der Legende steht für die Klassifizierungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$.

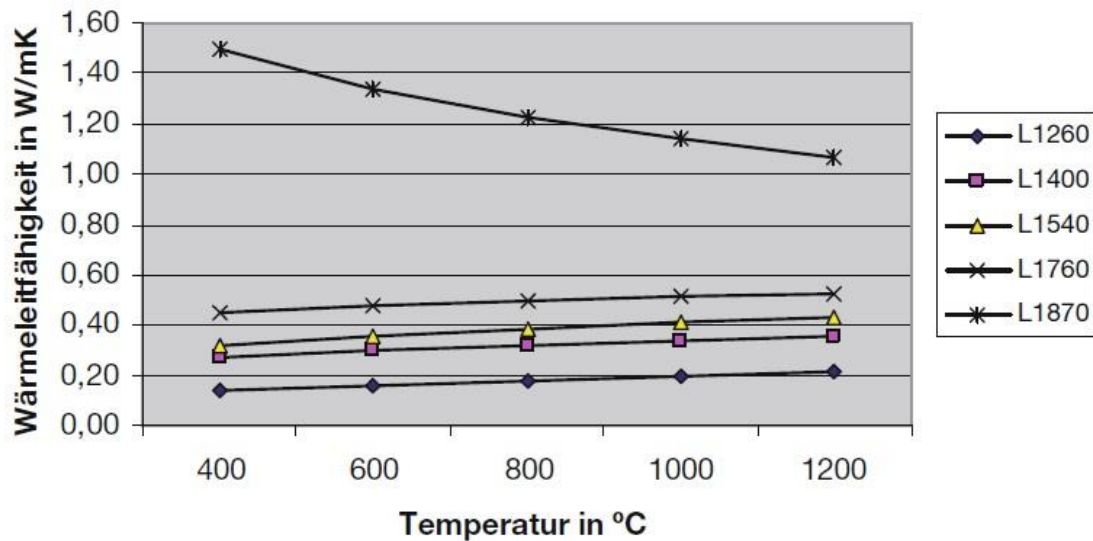


Abbildung 32 Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Feuerleichtsteine [9]

4.1.2 Hochtemperaturwolle

Hochtemperaturwolle (HTW) besteht aus anorganischen Fasern und zeichnet sich durch geringe Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität aus. Außerdem ist sie unempfindlich gegenüber hohen Temperaturgradienten, kann also schnell aufgeheizt und wieder abgekühlt werden. Je nach Ausgangsmaterial erstreckt sich die Klassifizierungstemperatur bis ca. 1800 °C. Die am häufigsten verwendeten Rohstoffe sind Al_2O_3 und SiO_2 . Außerdem werden Erdalkalioxide (CaO oder MgO), sowie Zirkoniumdioxid ZrO_2 eingesetzt. Der Nachteil von Dämmstoffen aus anorganischen Fasern ist die Entstehung von Feinstaub. Dies geschieht durch Faserbruch bei der Verarbeitung und durch die hohen Einsatztemperaturen. Dieser Staub ist lungengängig und wird als cancerogen eingestuft. Der Grund dafür ist die im Allgemeinen sehr hohe Biobeständigkeit der Fasern. Das bedeutet, dass der Faserstaub lange Zeit in der Lunge verbleibt. Erdalkalioxidhaltige Fasertypen wurden entwickelt, um die Biobeständigkeit zu senken. Deshalb sind HTW mit einem Massenanteil an Erdalkalioxiden von > 18 % nicht als krebserregend eingestuft. Für die Verwendung der anderen Fasertypen liegen genaue Handlungsanweisungen vor [15]. Abbildung 33 zeigt die Zusammensetzung der gängigsten HTW-Typen.

Hochtemperaturwolletyp	SiO_2 %	Al_2O_3 %	$\text{CaO}+\text{MgO}$ %	ZrO_2 %	andere Oxide %
Erdalkalisilikat - Calciummagnesiumsilikat (CMS) - Calciummagnesiumzirkonsilikat (CMZS) - Magnesiumsilikat (MS)	50-82		18-43		<7
Aluminiumsilikat	46-52	48-54			<1
Aluminiumzirkonsilikat	> 48	<37		<20	<1
Mullit- und Aluminiumoxid	3-28	71-97			<1

Abbildung 33 Hochtemperaturwolle-Typen [15]

4.1.3 Mikroporöse Dämmstoffe

Mikroporöse Dämmstoffe zählen zu den sogenannten Superisolierungen, da ihre Wärmeleitfähigkeiten unterhalb der von ruhender Luft liegen [9]. Um zu verstehen, wie diese Werte erreicht werden, muss der Wärmetransport im Material genauer betrachtet werden. Der Gesamtwärmeübergang setzt sich zusammen aus Wärmeleitung in Fest- und Gasphase, Wärmestrahlung und Konvektion (vgl. Abbildung 34). Aufgrund der hohen Porosität ist die Festkörper-Wärmeleitung durch die große Wegstrecke um die Poren herum beeinträchtigt. Neben der hohen Porosität ist die Porengröße sehr gering ($< 0,1 \mu\text{m}$) und liegt somit im Bereich der mittleren freien Weglänge von Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen. Deshalb können die Moleküle den Porenraum durchqueren, ohne zusammen zu stoßen. Dadurch ist die Wärmeleitung in der Gasphase behindert. Der Wärmetransport durch Strahlung innerhalb des Dämmstoffes wird durch spezielle Trübungsmittel herabgesetzt. Außerdem wird der konvektive Wärmeübergang durch die Behinderung der Molekülbewegung innerhalb der kleinen Poren verringert. Hauptbestandteil von mikroporösen Dämmstoffen ist pulverförmige pyrogene Kieselsäure, die mit Trübungsmitteln, Fasern und anderen Zusätzen versetzt ist. Das Pulver wird zu Formteilen und Platten gepresst, oder unter Vakuum in spezielle Folien eingeschweißt.

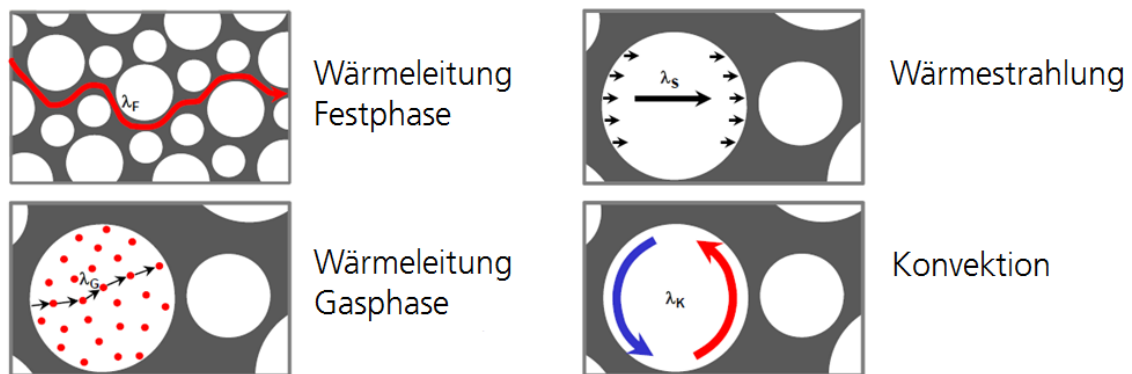


Abbildung 34 Wärmeübergang bei mikroporösen Dämmstoffen, nach [16]

4.1.4 Wahl des Dämmstoffes

Eine Wärmedämmung aus Hochtemperaturwolle scheidet aufgrund der möglichen gesundheitsschädlichen Emissionen aus. Feuerleichtstein und mikroporöse Dämmstoffe können prinzipiell verwendet werden, allerdings muss die Dämmstärke bei Erstgenanntem deutlich größer ausfallen. Das liegt an der höheren Wärmeleitfähigkeit. Für eine Verwendung einer Feuerleichtsteindämmung spricht die bessere mechanische Belastbarkeit. Die Wahl fällt schließlich auf eine Dämmung aus mikroporösem Dämmstoff, da dadurch die Versuchsvorrichtung kompakt gehalten werden kann. Außerdem sind am Institut schon mikroporöse Dämmplatten vom Typ MB1000 [17] (Datenblatt s. Anhang 10.3, Abbildung 95), hergestellt von der Becker Insulation GmbH, vorhanden. Die mechanische Stabilität wird durch einen Metallmantel sichergestellt.

4.1.5 Dämmstärke

Die notwendige Dämmstärke wurde bestimmt, indem zunächst eine vereinfachte Berechnung des Wärmeübergangs durchgeführt wurde. Mit dem daraus resultierenden Ergebnis erfolgte die Erstellung eines Computermodells der Scherzelle, das mit Hilfe von FEM-Simulationen berechnet wurde. Ziel der Simulationen war die Kenntnis der Temperaturverteilung in der Versuchsvorrichtung im

thermisch stationären Zustand. Außerdem sollte die benötigte Aufheizzeit auf Betriebstemperatur durch transiente Analysen bestimmt werden. Die manuelle Berechnung wurde für den thermisch stationären Zustand durchgeführt. Das bedeutet, dass die Wärmeströme durch Wärmeleitung \dot{Q}_{WL} und Konvektion \dot{Q}_{Kon} definitionsgemäß gleich groß sind. Das erlaubt ein Gleichsetzen der jeweiligen Berechnungsvorschriften. Aus der resultierenden Gleichung lässt sich die Dämmstärke ableiten. Für die Berechnung wurde die Dämmung zunächst als einfacher Zylinder betrachtet. Dabei wurden die Schnittflächen, die aufgrund des zweiteiligen Aufbaus der Dämmung entstehen, vernachlässigt. Die erhaltene Wandstärke wurde dann auch für den Deckel und den Boden der Dämmung angenommen. Abbildung 35 zeigt einen Querschnitt durch den Zylinder mit Innendurchmesser r_i und Außendurchmesser r_a . Die Temperatur der inneren bzw. äußeren Wand wird mit $\vartheta_{W,i}$ bzw. $\vartheta_{W,a}$ bezeichnet. Der Zustand der Umgebungsluft wurde als ruhend angenommen, somit liegt lediglich freie Konvektion vor. Die Umgebungstemperatur wird durch ϑ_a beschrieben. In den folgenden Abschnitten erfolgt die detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise bei der Berechnung der Dämmstärke.

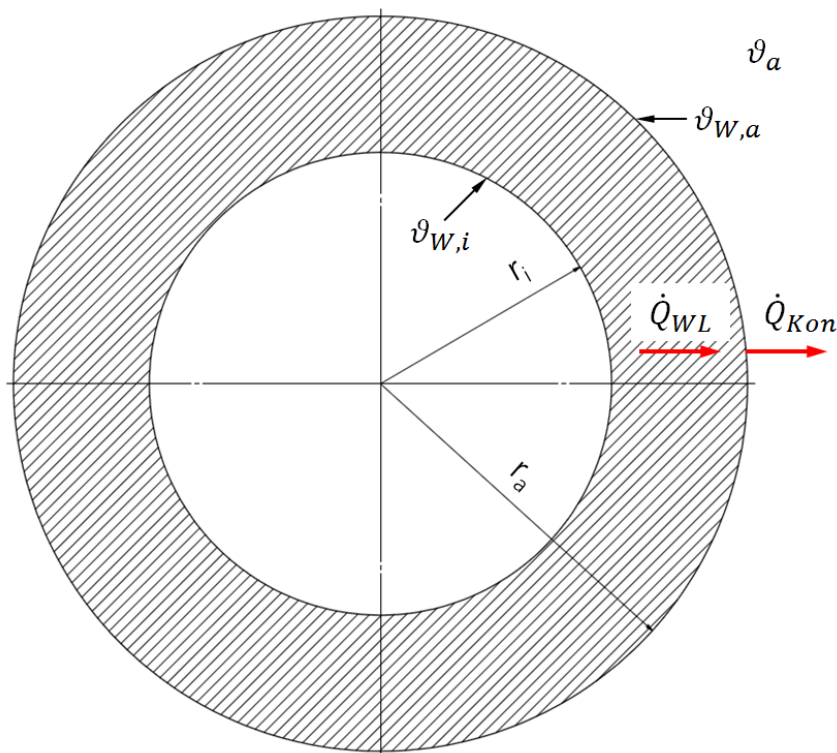


Abbildung 35 Zylinderförmige Wärmedämmung

Die Grundlage für die Berechnung wurden in Kapitel 2.2.1 geschaffen. Für die Anwendung auf das Berechnungsmodell werden sie entsprechend angepasst [9]. Der Gesamtwärmestrom durch Wärmeleitung \dot{Q}_{WL} innerhalb der Zylinderwand wird anhand Gl. (54) berechnet. Dabei ist $l_{Zylinder}$ die Höhe des Zylinders. Die Wärmeleitfähigkeit λ des Dämmstoffes wird als konstant angenommen.

$$\dot{Q}_{WL} = \frac{2 * \pi * l_{Zylinder} * (\vartheta_{W,i} - \vartheta_{W,a})}{\frac{1}{\lambda} * \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad (54)$$

Im thermisch stationären Zustand muss der Wärmestrom \dot{Q}_{WL} , der die Außenfläche des Zylinders durchsetzt, dem Wärmestrom durch Konvektion \dot{Q}_{Kon} an dieser Stelle entsprechen. Dieser ergibt

sich in diesem Fall zu Gl. (55). Er ist von der Größe der Außenfläche $A_{Zylinder}$ des Zylinders abhängig (s. Gl. (56)). Der Wärmeübergangskoeffizient α kann durch Umformung von Gl. (3) mit Hilfe der Nusselt-Korrelation (Gl. (57)) für freie Konvektion an vertikalen Flächen bestimmt werden [9]. Die Rayleigh-Zahl Ra wird anhand Gl. (5) berechnet. Durch die Funktion $f_1(Pr)$ (s. Gl. (58)) wird der Einfluss der Prandtl-Zahl Pr (Gl. (7)) ausgedrückt.

$$\dot{Q}_{Kon} = A_{Zylinder} * \alpha * (\vartheta_{W,a} - \vartheta_a) \quad (55)$$

$$A_{Zylinder} = 2 * \pi * r_a * l_{Zylinder} \quad (56)$$

$$Nu = \left(0,825 + 0,387 * [Ra * f_1(Pr)]^{\frac{1}{6}} \right)^2 \quad (57)$$

$$f_1(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{-16}{9}} \quad (58)$$

Als erstes wird die Rayleigh-Zahl Ra berechnet. Die dafür notwendigen Faktoren β , ν und a können aus der Tabelle mit Stoffdaten trockener Luft [9] entnommen werden. Die Referenztemperatur ϑ_{ref} ergibt sich aus Gl. (6). Eine Temperatur der Außenwand der Dämmung $\vartheta_{W,a}$ von maximal 60°C ist als Wunsch in der Anforderungsliste vermerkt um Verbrennungen durch Berührung zu verhindern. Die Temperatur der außerhalb der Dämmung liegenden Wellenansätze der Scherzelle wird diesen Wert jedoch bei Weitem übersteigen. Deshalb muss ohnehin eine geeignete Sicherheitsvorrichtung vorgesehen werden. Aufgrund dessen wird für die Auslegung der Dämmung eine Außenwandtemperatur $\vartheta_{W,a}$ von 100°C zugelassen. Dadurch können Bauraum und Kosten eingespart werden. Die Weglänge des Wärmeübergangsproblems L entspricht der Höhe $l_{Zylinder}$ des Zylinders.

Wandtemperatur der Dämmung $\vartheta_{W,a}$ [$^\circ\text{C}$] (Annahme)	100
Temperatur der Umgebungsluft ϑ_a [$^\circ\text{C}$] (Annahme)	20
Referenztemperatur ϑ_{ref} [K]	60
Erdbeschleunigung g [$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$]	9,81
Charakteristische Weglänge L [m]	0,18
thermischer Ausdehnungskoeffizient β [$\frac{1}{\text{K}}$]	$3,007 * 10^{-3}$
kinematische Viskosität ν [$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$]	$192,2 * 10^{-7}$
Temperaturleitfähigkeit der Luft a [$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$]	$273,2 * 10^{-7}$
Rayleigh-Zahl Ra [–]	$26,21 * 10^6$

Als nächstes wird die Nusselt-Korrelation (Gl.(57)) berechnet. Der Wert der Prandtl-Zahl kann berechnet, oder aus der Stoffdatentabelle abgelesen werden. Daraufhin wird der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit der Luft λ_{Luft} entstammt der Stoffdatentabelle für trockene Luft [9]. Anschließend werden die Gleichungen (54) und (55) gleichgesetzt und die Außenfläche $A_{Zylinder}$ mit Gl. (56) substituiert. Die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes λ_D wird dem technischen Datenblatt [17] entnommen. Sie wird als konstant angenommen und über den Tempe-

raturbereich gemittelt. Abschließend wird nach dem Außenradius r_a der Dämmung aufgelöst. Die Dämmstärke s ergibt sich aus der Differenz der beiden Radien.

Prandtl-Zahl Pr [–]	0,7035
$f_1(Pr)$ [–]	0,3456
Nusselt-Zahl Nu [–]	41,12
Wärmeleitfähigkeit der Luft λ_{Luft} $\left[\frac{mW}{m \cdot K}\right]$	28,80
Charakteristische Weglänge L [m]	0,18
Wärmeübergangskoeffizient α $\left[\frac{mW}{m^2 \cdot K}\right]$	6579
Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes λ_D $\left[\frac{mW}{m \cdot K}\right]$	30
Innenradius der Dämmung r_i [m]	0,085
Außenradius der Dämmung r_a [m]	0,123
Dämmstärke s [mm]	38

Aufgrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen wird die Dicke der Dämmung für das weitere Vorgehen auf 50 mm festgelegt. Es folgt die Auslegung der Geometrie der Wärmedämmung.

4.1.6 Geometrie der Wärmedämmung

Die Wärmedämmung umschließt die Scherzelle dergestalt, dass in alle Richtungen ein Abstand zwischen Scherzelle und Dämmung von 30 mm besteht. In dem entstehenden Raum befinden sich die Heizelemente in einer ringförmigen Anordnung. Abbildung 36 zeigt die prinzipielle Konstruktion der Wärmedämmung. Die Dämmung soll leicht montiert und demontiert werden können, ohne anderweitige Veränderungen an der Versuchsvorrichtung vorzunehmen. Deshalb wird ein zweiteiliger Aufbau gewählt. Somit kann die Dämmung beispielsweise nach Versuchsende entfernt werden, um ein schnelleres Auskühlen der Scherzelle zu ermöglichen. Außerdem ist der Probenraum dadurch leichter zugänglich. Die Heizelemente werden von oben in den Spalt zwischen Dämmung und Scherzelle eingeführt, dementsprechend werden Aussparungen vorgesehen. Ebenso sind Aussparungen für die Durchführung des Führungsbolzens und der Welle nach unten notwendig. An der Schnittstelle der beiden Hälften ist der Dämmstoff so geformt, dass eine Überlappung entsteht. Dies dient der Kompensation eventueller Schwindung des Materials und sorgt für eine bessere Dämmwirkung an den Schnittstellen der beiden Hälften. Die mechanische Stabilität wird durch einen Metallmantel gewährleistet, an dem Schnellverschlüsse angebracht sind. Innen wird der Dämmstoff zum Schutz mit einer sogenannten Kalottenfolie ausgekleidet. Diese besitzt viele kleine Vertiefungen, die lokale Wärmeausdehnungen zulassen, ohne die ursprüngliche Form stark zu verändern. Sie besteht aus einer Nickelbasislegierung und zeichnet sich durch die hohe Hitzebeständigkeit aus. Die detaillierten Zeichnungen befinden sich im Anhang dieser Arbeit (Anhang 10.1, Abbildung 81 bis Abbildung 83).

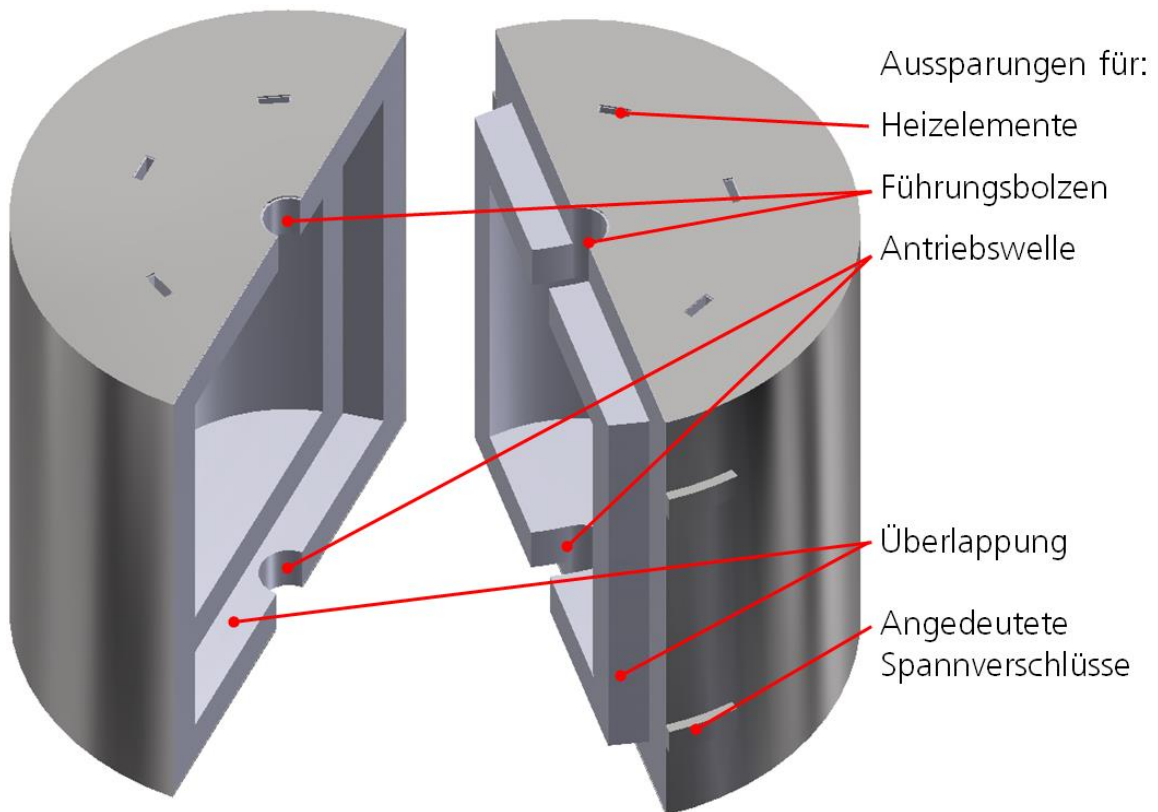


Abbildung 36 prinzipieller Aufbau der Wärmedämmung

4.2 Auslegung der Heizung

Das Ziel der Heizungsauslegung ist es, die Erhitzung der Partikelprobe auf mindestens 850 °C in höchstens einer Stunde zu bewerkstelligen. Die Wärmeenergie zur Erhitzung der Versuchsvorrichtung soll durch Wärmestrahlung von den Heizelementen auf die Scherzelle übertragen werden. Diese Methode bietet den Vorteil, dass kein physischer Kontakt zwischen Heizung und den metallischen Komponenten notwendig ist. Die Wahl der Heizelemente fällt auf vollkeramische, elektrische Strahlungsheizer der Firma Bach Resistor Ceramics GmbH [18]. Diese bestehen, wie in Abbildung 37 dargestellt, aus einer beheizten und einer unbeheizten Zone. Außerdem sind sie bis zu einer Temperatur von 1000 °C einsetzbar. Durch die Einschränkung, dass die Temperatur an der elektrischen Anschlussstelle maximal 500 °C betragen darf, muss diese außerhalb der Dämmung liegen.



Abbildung 37 Vollkeramischer, elektrischer Strahlungsheizer, nach [19]

Die Heizelemente sind in verschiedenen Formen und mit unterschiedlichen Leistungen erhältlich. Aufgrund der Geometrie der Dämmung kommen für den betrachteten Anwendungsfall zwei Typen in Frage. Die Daten entstammen den Datenblättern ([20], [21]), die in Anhang 10.3 dieser Arbeit zu finden sind (Abbildung 96 und Abbildung 97). Die Länge der beheizten Zone ist individuell konfigurierbar, deshalb stimmen die in Tabelle 5 eingetragenen Werte an dieser Stelle nicht mit den Datenblättern überein.

Tabelle 5 Daten der möglichen Heizelemente

Typ	„STR 210“	„STR 228“
Länge [mm]	210	228
Breite [mm]	14,5	30
Dicke [mm]	4	4,5
Länge der beheizten Zone [mm]	80	120

4.2.1 FEM-Analyse

Zur Bestimmung der besten Lösungsvariante wurden verschiedene Heizungskonfigurationen mit Hilfe von FEM-Simulationen untersucht. Das Auswahlkriterium ist die benötigte Aufheizzeit der Partikelprobe. Dementsprechend wurden transiente thermische Analysen durchgeführt. Die detaillierte Dokumentation mit der Definition der Randbedingungen und verwendeter Materialdaten befindet sich im Anhang. An dieser Stelle werden die Ergebnisse und ihre Bedeutung vorgestellt. Analysiert wurden die in Tabelle 6 aufgelisteten Konfigurationen.

Tabelle 6 Untersuchte Heizungskonfigurationen

Heizelement-Typ	Anzahl [-]	Heiztemperatur [°C]	Bezeichnung der Variante
„schmal“ (210x14,5 mm, 80 mm beheizte Zone)	4	900	S4-900

„schmal“ (210x14,5 mm, 80 mm beheizte Zone)	4	950	S4-950
„schmal“ (210x14,5 mm, 80 mm beheizte Zone)	6	900	S6-900
„schmal“ (210x14,5 mm, 80 mm beheizte Zone)	6	950	S6-950
„breit“ (228x30 mm, 120 mm beheizte Zone)	4	900	B4-900
„breit“ (228x30 mm, 120 mm beheizte Zone)	4	950	B4-950
„breit“ (228x30 mm, 120 mm beheizte Zone)	6	900	B6-900

Zur besseren Übersicht ist in Abbildung 38 anhand der Konfiguration mit vier breiten Heizelementen die vereinfachte Geometrie der Scherzelle in einer Schnittansicht dargestellt. Bei allen Analysen, die verglichen werden, ist der Grundaufbau der Geometrie identisch. Die einzige Änderung bezieht sich auf Anzahl und Form der Heizelemente (vgl. Tabelle 6). Die Ergebnisse der transienten thermischen Analysen sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

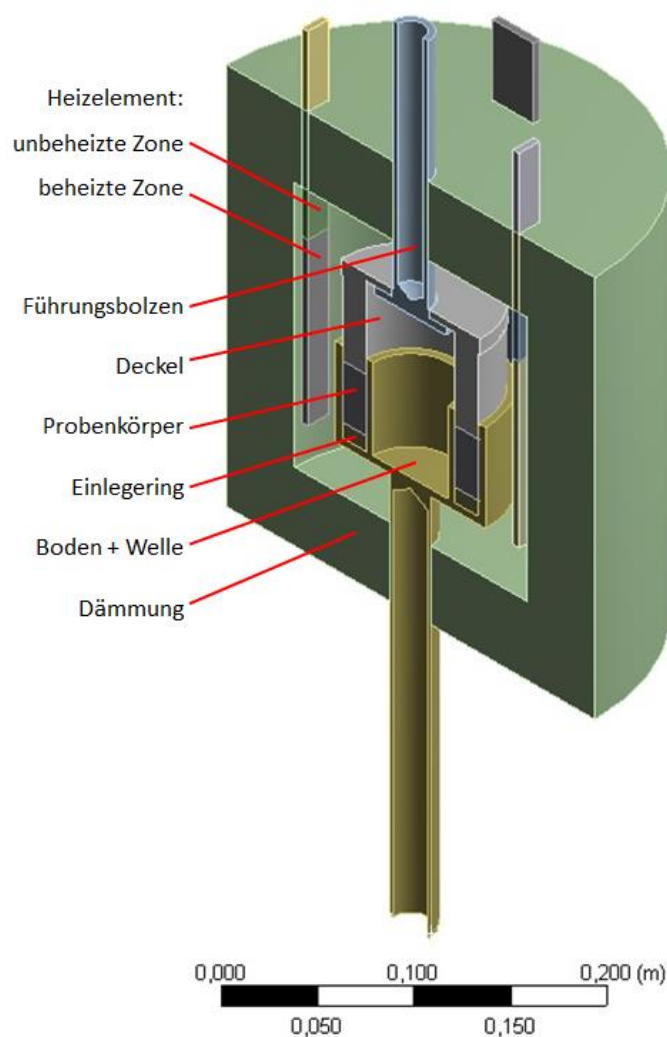


Abbildung 38 Vereinfachtes Modell der Scherzelle für die FEM-Analysen

Tabelle 7 Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs

Fall	Konfiguration	Heiztemperatur [°C]	Min. Probertemp. [°C] (nach 3600 s)
1	4 schmale Heizelemente	900	*
2	4 schmale Heizelemente	950	766,28
3	6 schmale Heizelemente	900	787,27
4	6 schmale Heizelemente	950	849,21
5	4 breite Heizelemente	900	846,65
6	4 breite Heizelemente	950	902,37
7	6 breite Heizelemente	900	870

* Zieltemperatur selbst im stationären Zustand nicht erreicht

Nach Bewertung und Vergleich der Analysen fällt die Wahl auf die Variante S6-950. Ob die Ergebnisse plausibel sind, soll nun Anhand einer Übersichtsrechnung überprüft werden. Dazu wird der thermisch stationäre Zustand des Modells mit der ausgewählten Heizungskonfiguration betrachtet. Der erste Vergleichswert ist dabei die Heizleistung \dot{Q}_{Heiz} , die durch Wärmestrahlung übertragen wird. Die Heizelemente und die mit ihnen im Strahlungsaustausch stehenden Körper der Scherzelle sind graue Strahler. Dabei unterscheidet sich der Emissionsgrad ε_{HE} der Heizelemente von dem Emissionsgrad ε_{SZ} der Scherzelle. Die Energiestromdichte \dot{e}_{Heiz} wird mit Gl. (14) und Gl. (15) berechnet. Sie ist äquivalent zur Wärmestromdichte \dot{q}_{Heiz} und ergibt, multipliziert mit der Gesamt-Oberfläche A_{HZ} der beheizten Zonen der Heizelemente, die Heizleistung \dot{Q}_{Heiz} .

Stefan-Boltzmann-Konstante $k \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$	$5,67 \cdot 10^{-8}$
Emissionsgrad der Heizelemente $\varepsilon_{HE} [-]$ (Herstellerangabe)	0,9
Emissionsgrad der Scherzelle $\varepsilon_{SZ} [-]$ (Annahme stark oxidiertes Metall)	0,8
Temperatur der Heizelemente $T_{HE} [K]$	1223,15
Temperatur der Scherzelle $T_{SZ} [K]$ (Annahme konstant über Oberfläche)	1173,15
Energiestromdichte $\dot{e}_{Heiz} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	14336
Höhe der beheizten Zone $L_{HZ} [m]$	0,08
Breite der beheizten Zone $B_{HZ} [m]$	0,0145
Dicke der beheizten Zone $H_{HZ} [m]$	0,004
Gesamt-Oberfläche der beheizten Zonen $A_{HZ} [m^2]$	0,018
Heizleistung $\dot{Q}_{Heiz} [W]$	259,6

Der zweite Vergleichswert ist die Verlustleistung \dot{Q}_V , die durch Konvektion transportiert wird. Die Berechnung erfolgt anhand von Gl. (2) unter der Annahme von freier Konvektion. Die genaue Verteilung der Wandtemperatur ϑ_w über die äußeren Flächen der Scherzelle kann bei dieser manuellen Rechnung nicht berücksichtigt werden. Darum wird die Gesamt-Verlustleistung $\dot{Q}_{V,ges}$ durch Addition der Teil-Verlustleistungen $\dot{Q}_{V,i}$ über die Oberflächen der verschiedenen Komponenten bestimmt. Die Berechnung erfolgt für die außerhalb der Dämmung liegenden Oberflächen des Führungsbol-

zens und der Welle nach unten, der Heizelemente und der Außenfläche der Dämmung an sich. Dafür werden die unterschiedlichen Wandtemperaturen $\vartheta_{W,i}$ als konstant über die jeweilige Fläche angenommen. Vereinfachend wird für alle Teilkomponenten der in Kapitel 4.1.5 bestimmte Wert für den Wärmeübergangskoeffizient α verwendet.

Lufttemperatur ϑ_{Luft} [°C]	20
Wärmeübergangskoeffizient α $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ (gerundet)	7
Länge der Führungsbolzens außerhalb der Dämmung $l_{FB,o}$ [m]	0,09
Durchmesser des Führungsbolzens d_{FB} [m]	0,026
Wandtemperatur des Führungsbolzens $\vartheta_{W,FB}$ [°C] (Annahme)	500
Verlustleistung über die Oberfläche des Führungsbolzens $\dot{Q}_{V,FB}$ [W]	24,7
Länge der Welle nach unten $l_{Welle,u}$ [m]	0,2
Durchmesser der Welle nach unten $d_{Welle,u}$ [m]	0,03
Wandtemperatur der Welle nach unten $\vartheta_{W,Welle,u}$ [°C] (Annahme)	300
Verlustleistung der Welle nach unten $\dot{Q}_{V,Welle,u}$ [W]	36,9
Länge der Heizelemente außerhalb der Dämmung $l_{HE,a}$ [m]	0,030
Breite der Heizelemente $B_{HE,a}$ [m]	0,0145
Dicke der Heizelemente $H_{HE,a}$ [m]	0,004
Wandtemperatur der Heizelemente außerhalb der Dämmung $\vartheta_{W,HE,a}$ [°C] (Annahme)	500
Verlustleistung der Heizelemente außerhalb der Dämmung $\dot{Q}_{V,HE,a}$ [W]	23,5
Höhe der Wärmedämmung l_D [m]	0,28
Durchmesser der Wärmedämmung d_D [m]	0,27
Wandtemperatur der Wärmedämmung $\vartheta_{W,D}$ [°C] (Annahme)	80
Verlustleistung der Wärmedämmung $\dot{Q}_{V,D}$ [W]	147,8
Verlustleistung $\dot{Q}_{V,ges}$ [W]	232,9

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse der FEM-Analysen des stationären Zustands aufgetragen. Ein Vergleich dieser Werte mit den manuell berechneten zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Ergebnisse der FEM-Untersuchungen können somit als plausibel eingestuft werden.

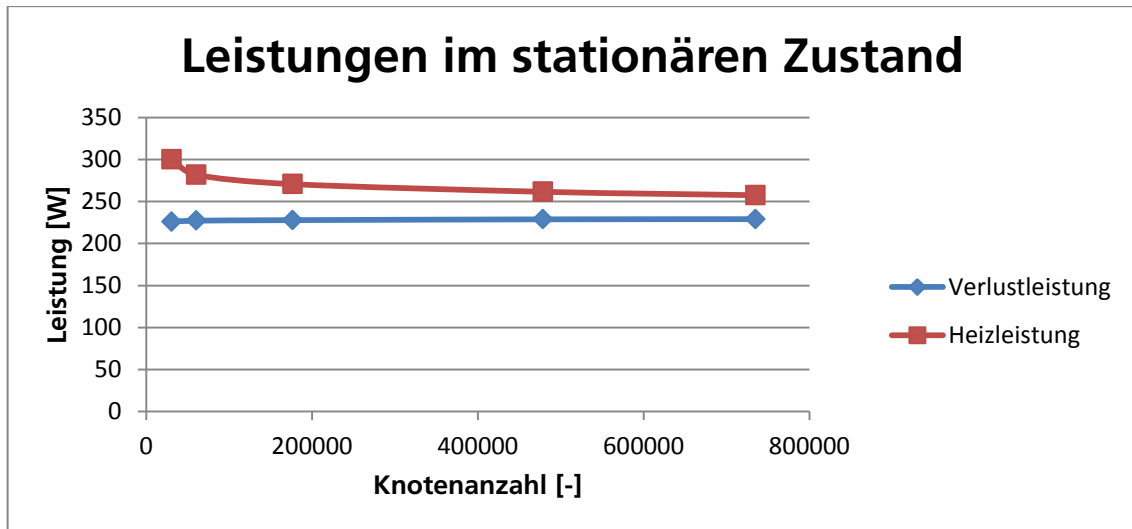


Abbildung 39 Leistungen im stationären Zustand

Im thermisch stationären Zustand sind Heiz- und Verlustleistung per Definition betragsmäßig gleich groß. Die Diskrepanz der berechneten Werte ist auf getroffene Annahmen und Vereinfachungen zurückzuführen. Für die Auswahl der Heizungskonfiguration hat dies jedoch keine Relevanz, da für alle untersuchten Varianten die gleichen Bedingungen gewählt wurden.

5 Messtechnik und Regelung

In dem Labor, in dem der Teststand aufgebaut und betrieben werden soll, ist bereits eine geeignete Infrastruktur zur Messdatenerfassung vorhanden. Damit werden die Daten sämtlicher Sensoren im Labor erfasst. Die Verarbeitung der Daten und die entsprechende Steuerung der Teststände erfolgt über einen PC, auf dem die Software LabView® installiert ist.

Relevante Messgrößen für die in dieser Arbeit entwickelte Versuchsvorrichtung sind die Drehzahl der Scherzelle, die Temperaturen der Partikelprobe und der Heizelemente und die Temperatur an der Außenseite der Dämmung. Zur Ansteuerung der Heizelemente und Speicherung der Messdaten wurde ein eigenes LabView®-Programm entwickelt. Es folgt die Beschreibung der verwendeten Sensoren und des Aufbaus des Messprogramms.

5.1 Drehzahlmessung

Berührungslose Messverfahren bieten die einfachste Möglichkeit, die Drehzahl der Scherzelle zu messen. Generell können sowohl optische, als auch induktive Sensoren für diesen Zweck verwendet werden. Da er bereits vorhanden ist, kommt der induktive Sensor BES00HF von BALLUFF® Sensors zum Einsatz ([22], Datenblatt s. Anhang 10.3, Abbildung 99). Die Drehzahlerfassung erfolgt, indem durch eine Erhebung auf der Welle einmal pro Umdrehung ein elektrisches Signal im Sensor induziert wird. Aus der Anzahl dieser Impulse pro Zeiteinheit kann die Drehzahl bestimmt werden.

5.2 Temperaturmessung

Die Temperatur wird an mehreren Stellen der Versuchsvorrichtung gemessen. Dabei wird die Information zum einen zur Regelung der Proben temperatur und zum anderen zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs der Vorrichtung verwendet. Die Messung erfolgt mit Thermoelementen vom Typ K. Bei diesem Typ bilden die Metalllegierungen Nickel-Chrom und Nickel-Aluminium das Thermopaar. Deshalb werden sie auch als NiCr-NiAl Thermoelemente bezeichnet. Dieser Typ wird aufgrund der guten Oxidationsbeständigkeit bevorzugt bei Temperaturen oberhalb von 550 °C eingesetzt [23]. Die Positionen und Aufgaben der einzelnen Thermoelemente sind in Tabelle 8 aufgelistet. Die Thermoelemente sind mit einem Mantel aus einer hochwarmfesten Nickelbasislegierung umgeben. Dieser Mantel hat einen Durchmesser von 1 mm und verfügt über einen minimalen Biegeradius vom zehnfachen Wert des Durchmessers. Zur Befestigung werden die Sensoren in Bohrungen in den Bauteilen gesteckt und am Ende der Bohrung gemäß dem minimalen Biegeradius abgewinkelt. Die Fixierung erfolgt durch ein dünnes Blech, das mittels Punktschweißverfahrens angebracht wird.

Tabelle 8 Thermoelemente, Positionen und Aufgaben

Thermoelement-Typ	Position	Aufgabe	Anzahl
Typ K	Im Deckel der Scherzelle	Messung der Proben temperatur	4
Typ K	Anschlussstelle der Heizelemente	Schutz vor Überhitzung ($\varnothing < 500\text{ °C}$)	6

Typ K	Beheizte Zone der Heizelemente	Einstellung der Heiztemperatur und Schutz vor Überhitzung ($\vartheta < 1000\text{ °C}$)	6
Typ K	Außenseite der Dämmung	Überwachung der Temperatur → Berührschutz	2

5.3 Mess-und Regelprogramm

Vor Erstellung des Programms musste zunächst ein Regelschema aufgebaut werden. Dieses wurde anschließend in LabView® umgesetzt. Die Heizelemente können bis zu einer Temperatur von 1000 °C betrieben werden, jedoch darf die Temperatur an den elektrischen Anschlussstellen aufgrund der Lötverbindung maximal 500 °C betragen. Es gibt somit zwei Temperaturwerte, die bei jedem Heizelement überwacht werden müssen. Die einfachste Variante der Regelung ist die Zweipunkt-Regelung. Dabei werden ein oberer und ein unterer Grenzwert für jede Temperatur vorgegeben. Die Heizelemente werden bei Erreichen des oberen Grenzwertes ausgeschaltet und kühlen daraufhin ab. Bei Unterschreiten des unteren Grenzwertes werden sie wieder eingeschaltet. Die Regelgröße fluktuiert also zwischen den beiden Grenzwerten. Die prinzipielle Funktionsweise der Regelung ist in Abbildung 40 dargestellt.

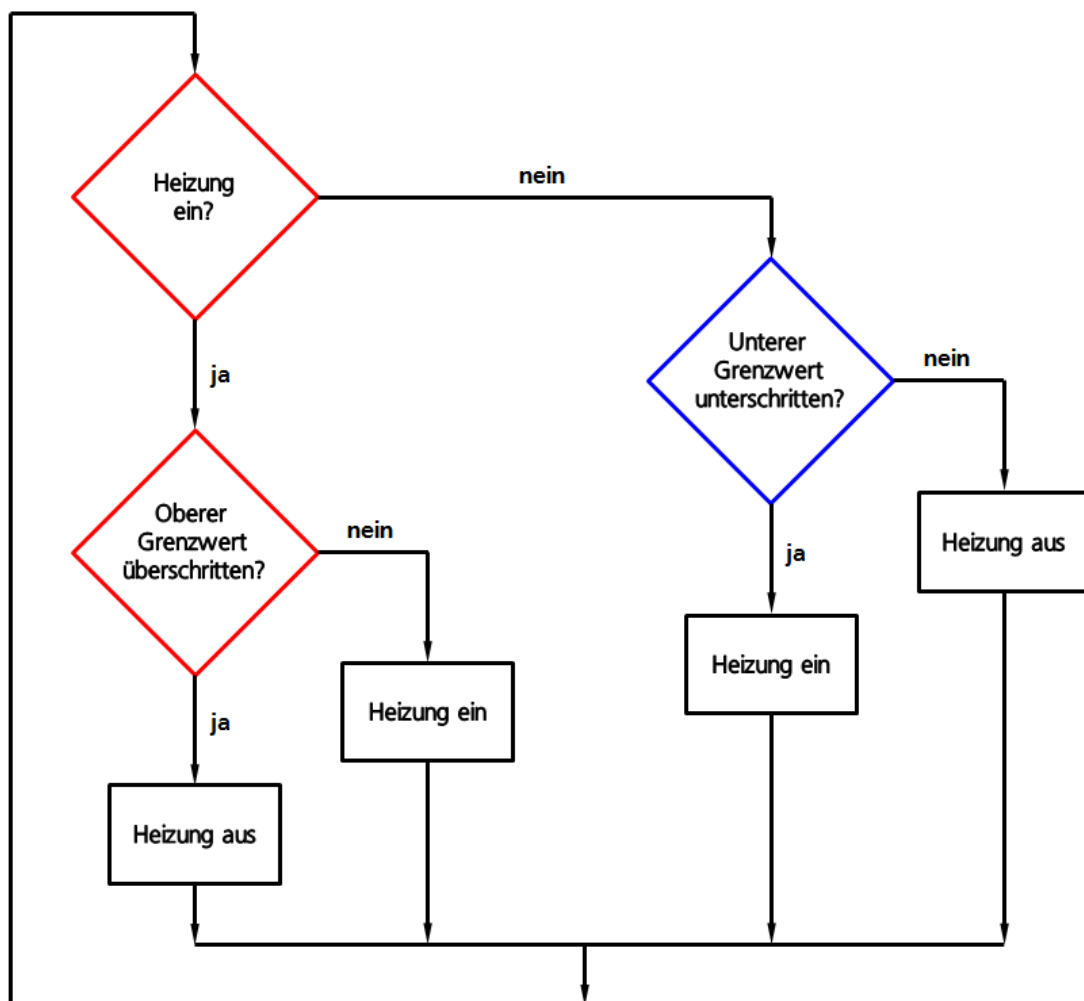


Abbildung 40 Regelschema der Heizung

6 Aufbau

Inhalt dieses Kapitels ist die Dokumentation des Aufbaus der Versuchsvorrichtung wie sie in den Kapiteln 3 und 4 ausgelegt wurde. Abbildung 41 zeigt eine Übersicht aller Komponenten des Teststands. Damit die Scherzelle sichtbar ist, ist nur eine Halbschale der Dämmung dargestellt. In den folgenden Abschnitten wird der Aufbau der einzelnen Komponenten in chronologischer Reihenfolge beschrieben.

Als erstes wurde der Rahmen der Tischkonstruktion der Versuchsvorrichtung entworfen. Als grundlegende Komponente dient das ITEM®-Profil mit den Abmessungen $40 \times 40 \text{ mm}$. Abbildung 42 zeigt das 3D-Modell des Entwurfs. Zur sicheren Aufnahme des hohen Gewichts des Motors (*ca.* 50 kg) wurden für die Motorhalterung breitere Profile ($80 \times 40 \text{ mm}$) verwendet. Die gesamte Vorrichtung steht auf Rollen um eine bestmögliche Mobilität zu gewährleisten. Zunächst wurden die quadratischen Profile zugeschnitten und zum äußeren Rahmen der Tischkonstruktion zusammengebaut. Anschließend wurde die Grundplatte zur Befestigung des Motors und der Lagerung gemäß der Zeichnung im Anhang mit Bohrungen versehen. Daraufhin erfolgte die Verschraubung der Platte mit der vormontierten Anordnung der breiten ITEM®-Profile. Im nächsten Schritt wurden die beiden Komponenten miteinander verbunden. Abbildung 43 zeigt den kompletten Unterbau der Versuchsvorrichtung.

Abbildung 44 zeigt den Einbau des Motors. Zur Befestigung wurde er mit den breiten, vertikalen ITEM®-Profilen verschraubt. Eine Gummimatte zwischen Motorauslage und Befestigungsplatte dient der Schwingungsdämpfung.

Als nächstes folgte das Einfügen der Gleitlagerbuchsen in die dafür vorgesehenen Lagersitze. Dazu wurden die aus Aluminium angefertigten Lagersitze erhitzt, sodass die Lagerbuchsen mit wenig Kraftaufwand eingepresst werden konnten. Das gleiche Vorgehen wurde bei der Montage der Wellenkupplung auf der Motorwelle angewandt. In Abbildung 45 ist zu sehen, wie der Antrieb und die Lagerung auf der Befestigungsplatte aufgebaut wurden. Zwischen Lager und Platte musste je ein Stück der gleichen Gummimatte, die die Motorschwingung dämpft, eingesetzt werden. Damit ist ein Fluchten der Antriebswelle mit den Lagerbuchsen gewährleistet.

Daraufhin wurde die Tischplatte mit Bohrungen versehen und mit dem Unterbau verschraubt. Die Verdreh-Sicherung besteht aus zwei vertikalen ITEM®-Profilen, auf denen der Querträger aufliegt. Der Querträger kann nachträglich so positioniert werden, dass die Rotationsachse des Deckels mit der der Bodeneinheit fluchtet. Das ist für die Vermeidung des Verkantens der Bauteile essenziell. Die Trägerkonstruktion der Entlastungsvorrichtung wurde nach dem gleichen Prinzip hergestellt.

Nachdem das Grundgerüst stand, begann der Aufbau der Scherzelle. Dazu wurde zunächst die Bodeneinheit der Scherzelle von oben durch die Bohrung in der Tischplatte in die Lagerung eingeführt und mit der Wellenkupplung verbunden. Das Ergebnis ist in Abbildung 46 dargestellt. Anschließend erfolgte die Herstellung der Schraubverbindung zwischen Deckel und dem Führungsbolzen. Diese Komponente wurde daraufhin komplett in die Bodeneinheit eingetaucht, damit der Querträger positioniert werden konnte.

Abbildung 47 zeigt das Vorgehen bei der Montage der Verdreh-Sicherung. Der Querträger wurde manuell so positioniert, dass die Bewegung der Deckeleinheit in vertikaler Richtung reibungsarm stattfindet. Durch die vergrößerten gewählten Durchmesser der Durchgangsbohrungen für die Befestigungsschrauben an den Enden des Querträgers war ausreichender Spielraum für die Positionierung vorhanden. Nach Einstellung der Position wurden die Befestigungsschrauben gleichmäßig angezogen.

Die Herstellung von Hebelarm und Lagerung für die Entlastungsvorrichtung erfolgte in der Instituts-eigenen Werkstatt gemäß den Zeichnungen im Anhang (s. Anhang 10.1, Abbildung 79 und Abbildung 80). Der Lagersitz wurde an dem dafür vorgesehenen Kragarm der ITEM®-Konstruktion befestigt. Als Achse dient eine M10-Schaftschraube wie in Abbildung 48 dargestellt. Der Lagerblock ist entlang des Kragarms verschiebbar. Somit kann die Position des Hebelarmes so eingestellt werden, dass das vordere Ende genau in der Flucht der Rotationsachse der Scherzelle liegt.

Zum Abschluss des mechanischen Aufbaus der Versuchsvorrichtung wurden M8-Augenschrauben in die Gewindebohrungen an den Enden des Hebelarms der Entlastungsvorrichtung eingeschraubt. Wie in Abbildung 49 zu sehen ist, erfolgt die Verbindung der Augenschrauben mit der Scherzelle und den Gegengewichten mit einem Stahlseil mit 3 mm Durchmesser. Die Gegengewichte werden von unten auf eine Gewindestange aufgefädelt und mit einer Flügelmutter gesichert. Das beschleunigt den Wechsel der Gewichte. Mit den in Abbildung 49 dargestellten Gewichten befindet sich die Vorrichtung im Gleichgewicht, der Deckel der Scherzelle ist also komplett entlastet.

Zum Füllen und Entleeren des Probenraums muss die gesamte Bodeneinheit herausgenommen werden. Das bedeutet, dass zunächst die Demontage des Querträgers der Verdreh-Sicherung erfolgen muss, bevor der Deckel komplett entfernt werden kann. Die Reproduzierbarkeit der Position des Querträgers wurde durch Passstifte realisiert.

Für die Anfertigung der Wärmedämmung wurde zunächst, wie in Kapitel 4.1.6 beschrieben, ein Blechmantel beauftragt. Die Herstellung erfolgte extern gemäß der im Anhang befindlichen Zeichnung. Abbildung 50 zeigt die fertigen Halbschalen des Mantels mit den eingeplanten Aussparungen und Spannverschlüssen. Der Blechmantel soll mit zugeschnittenen Teilen aus den vorhandenen mikroporösen Dämmplatten gefüllt werden. Für die Form der Zuschnitte wurden zunächst Schablonen aus Aluminiumblech hergestellt. Form und Abmessungen der Teile sind in Anhang 10.1, Abbildung 84 dargestellt.

Zur Schutz des Dämmstoffes vor mechanischen Belastungen wurde die Innenseite der Halbschalen mit Kalottenfolie ausgekleidet. Die Folie wurde mit einer Blechschere zugeschnitten und die Einzelteile anschließend mittels Punktschweißverfahrens verbunden. Abbildung 51 zeigt das Ergebnis. An den Verbindungsstellen sind durch den Wärmeeintrag beim Punktschweißen Anlassfarben entstanden. Zu erkennen ist auch die Überlappung des Dämmstoffes an der Berührfläche der Halbschalen. Zum Abschluss des Aufbaus der Wärmedämmung folgt die Integration der Heizelemente. Sie werden von oben durch die vorgesehenen Aussparungen in den Innenraum der Dämmung eingeführt. Da die elektrischen Kontakte an den Anschlussstellen der Heizer freiliegen, erfolgt ein Kurzschluss, sobald die Kontakte die metallische Oberfläche des Dämmmantels berühren. Um das zu verhindern wurde eine Halterung aus Edelstahlblechen entworfen, die eine eventuelle Bewegung der Heizelemente nach unten verhindert.

Vor der Inbetriebnahme des Teststandes muss der elektrische Anschluss des Antriebs vorgenommen werden. Bei dem Motor handelt es sich um eine Drehstrom Asynchronmaschine mit Stirnradgetriebe von SEW-Eurodrive [24]. Zur Drehzahlregelung wird der Motor über einen Frequenzumrichter betrieben, der ebenfalls von SEW-Eurodrive stammt. Der Anschluss wird von einer Elektrofachkraft durchgeführt. Zusätzlich werden dafür ein Leistungsschutz, ein Relaiskoppler und ein externes 24 V Netzteil benötigt. Der vollständige elektrische Anschluss ist in Abbildung 53a) dargestellt.

Bei rotierenden Bauteilen besteht immer die Gefahr von umherfliegenden Gegenständen. Außerdem kann es beim Betrieb der Scherzelle zu einer Verklemmung der gegeneinander rotierenden Komponenten kommen. Trotz der Auslegung für einen solchen Fall besteht ein Restrisiko der Zerstörung der Versuchsvorrichtung mit potenzieller Gefährdung von in der Nähe befindlichen Personen. Darüber hinaus liegen an den Anschlussstellen der Heizelemente elektrische Kontakte offen und es herrschen zum Teil hohe Oberflächentemperaturen an den Komponenten der Versuchsvorrichtung. Zur Minimierung des Gefährdungspotenzials durch genannte Gründe wurde ein Schutzgitter um den oberen Teil des Teststandes aufgebaut (s. Abbildung 53b)).

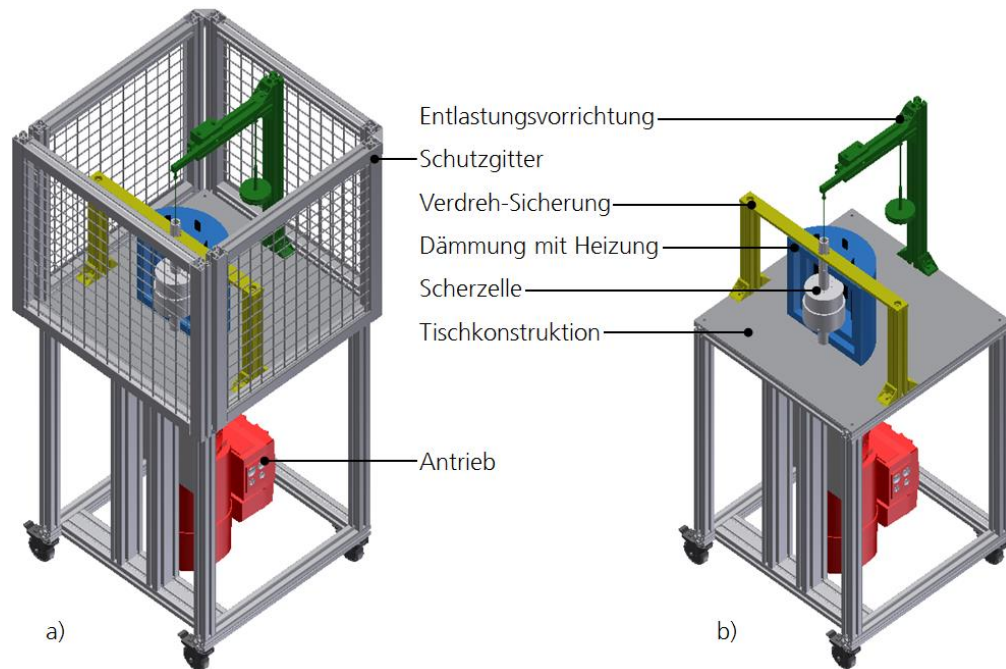


Abbildung 41 Übersichtsdarstellung der Versuchsvorrichtung, a) mit Schutzgitter, b) ohne Schutzgitter



Abbildung 42 Rahmenkonstruktion des Teststandes

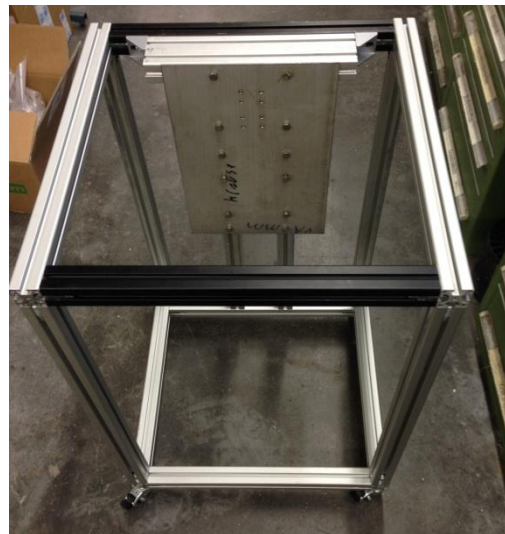


Abbildung 43 Gesamt-Unterbau des Teststandes

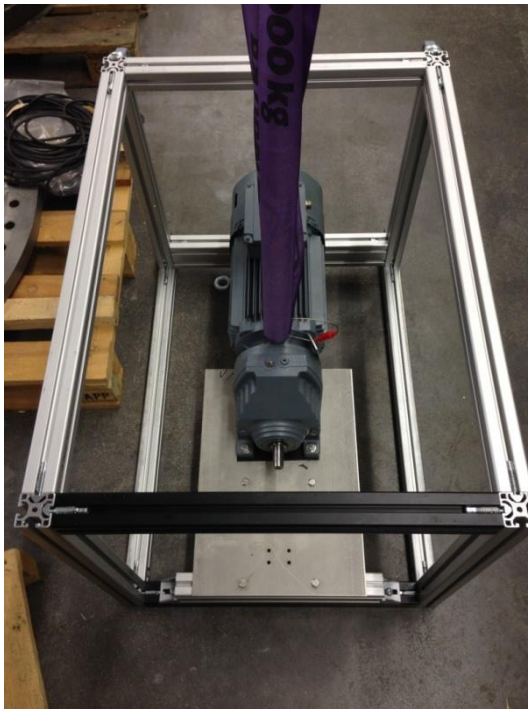


Abbildung 44 Montage des Motors



Abbildung 45 Aufbau Antrieb und Lagerung

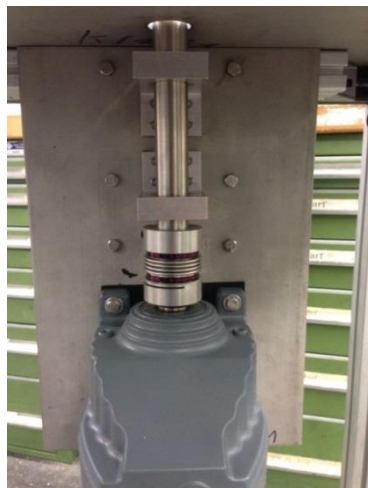


Abbildung 46 Antriebswelle der Scherzelle



Abbildung 47 Positionierung der Verdreh-Sicherung



Abbildung 48 Entlastungsvorrichtung



Abbildung 49 vollständiger mechanischer Aufbau



Abbildung 50 Blechmantel der Wärmedämmung



Abbildung 51 Auskleidung der Dämmung mit Kalottenfolie



Abbildung 52 Befestigung der Heizelemente



Abbildung 53 a) elektrischer Anschluss des Antriebs, b) Schutzgitter

7 Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme der Versuchsvorrichtung erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst wurde ausschließlich die Scherzelle betrachtet, anschließend gesondert die Heizung und zum Schluss die komplette Versuchsvorrichtung (vgl. Tabelle 9). Zu Beginn der Inbetriebnahme war die manuelle Einstellung der Drehzahl des Motors notwendig. Dazu wurden die Verdreh-Sicherung und der Deckel der Scherzelle demontiert, sodass nur noch die Bodengruppe mit dem Motor verbunden war. Der Frequenzumrichter verfügt über eine digitale Anzeige, auf der die errechnete Motordrehzahl angezeigt wird. Über einen Drehregler kann diese eingestellt werden. Zur Ermittlung der tatsächlichen Drehzahl der Bodengruppe wurde daran eine Markierung angebracht und die Umdrehungen innerhalb einer Minute gezählt. Bei einer angezeigten Motordrehzahl von 100 min^{-1} ist die gewünschte Drehzahl der Scherzelle von ca. 40 min^{-1} erreicht.

Tabelle 9 Vorgehensweise bei der Inbetriebnahme

Inbetriebnahme: Testreihenfolge	
Einstellung der Drehzahl	
Scherzelle	1. Test: große Partikel
	2. Test: kleine Partikel
	3. Test: mittelgroße Partikel
Heizung	
Komplette Versuchsvorrichtung	Ohne Rotation (Probenraum gefüllt)
	Mit Rotation (Probenraum gefüllt)
	Nach Geometrie Anpassung, Aufheizen bei Rotation (Probenraum gefüllt)
	Nach Geometrie Anpassung, Aufheizen bei Rotation (Probenraum leer)
	Nach Geometrie Anpassung, Aufheizen stufenweise im Stillstand, auf jeder Stufe Rotationstest (Probenraum leer)
	Aufheizen mit randvollem Probenraum und aufgesetztem Deckel bei Rotation
	Vergleich der realen Aufheizzeit mit der Simulation

7.1 Funktionstest mit großen Partikeln

Im Anschluss folgte der erste Funktionstest mit einer Partikelprobe. Der Durchmesser der Partikel betrug ca. 2 mm und der Probenraum wurde bis ca. 10 mm unterhalb des oberen Randes gefüllt. Das entspricht der Auslegungsfüllhöhe. Im Betrieb der Scherzelle muss der Führungsbolzen des Deckels möglichst reibungsarm durch den Formschluss mit dem Querträger der Verdreh-Sicherung gleiten. Um dies zu gewährleisten wurde der Querträger zunächst entsprechend positioniert und anschließend mit den beiden Befestigungsschrauben fixiert. Für diesen Test hatte die Anzahl der Gegengewichte der Entlastungsvorrichtung keine Relevanz, die Wahl fiel ohne bestimmte Begründung auf zwei Stück. Die Testdauer betrug ca. 10 min .

Nach dem Test wurde die Entlastung ausgehängt, der Querträger demontiert und der Deckel vorsichtig herausgenommen. Bei Betrachtung der Unterseite des Deckels fiel auf, dass sich in einigen der Vertiefungen Partikel festgesetzt hatten (s. rote Kreise in Abbildung 54). Diese waren nur mit einigem Kraftaufwand wieder zu entfernen. Außerdem sind auf der Metalloberfläche Schleifspuren zu erkennen. Es ist somit offensichtlich zu einer Relativbewegung zwischen Partikeln und Metall gekommen. Der Abrieb an der Oberfläche hängt direkt mit der Relativbewegung zusammen, je dunkler die Farbe des Metalls, desto mehr Bewegung hat an dieser Stelle stattgefunden. In Rotationsrichtung direkt hinter den Vertiefungen hat es praktisch keinen Abrieb gegeben. Das lässt darauf schließen, dass die festgesetzten Partikel eine Art Totzone hinter sich bilden, in der keine Berührung zwischen Partikeln und Wand stattfindet. Vor den Vertiefungen sind ebenfalls leicht hellere Bereiche zu erkennen, was auf eine Aufstauung der Partikel, und somit geringere, Relativbewegung schließen lässt. Die erhoffte Wirkung der Vertiefungen, wonach eine Relativbewegung zwischen Partikeln und Deckel komplett verhindert werden sollte, ist damit nicht eingetreten. Die Wirksamkeit beschränkt sich auf einen kleinen Bereich um die Vertiefungen herum.

Im nächsten Schritt wurde die Bodengruppe der Scherzelle aus der Kupplung gelöst und nach oben herausgezogen. Nach Entleerung der Partikelprobe waren ebenfalls Schleifspuren an den Wänden des Probenraums zu erkennen. Diese sind in Abbildung 55 als helle Streifen zu sehen. Auch hier lässt sich daraus wieder schließen, dass an diesen Stellen Relativbewegung zwischen Wand und Partikeln stattgefunden hat. Im unteren Bereich der Probe gibt es dagegen eine große Zone ohne Schleifspuren. In diesem Bereich fand somit keine Relativbewegung statt. Zwischen den beiden Zonen ist ein schmaler Übergangsbereich zu sehen. Eine plausible Erklärung für diese Beobachtung ist die in Kapitel 2.1 beschriebene Fehlerzone. Die Funktionsweise der Scherzelle entspricht somit der Theorie, was die korrekte Auslegung der Versuchsvorrichtung bestätigt.

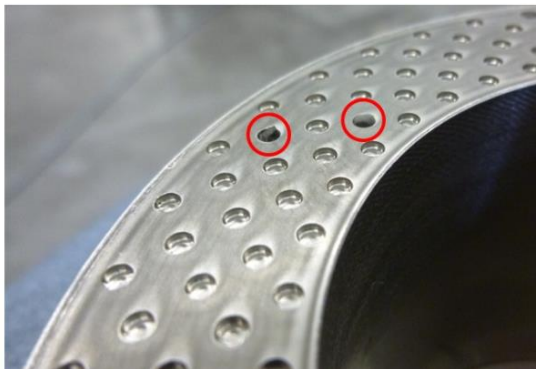


Abbildung 54 Unterseite des Deckels
nach erstem Funktionstest



Abbildung 55 Bodengruppe nach erstem
Funktionstest

7.2 Funktionstest mit kleinen Partikeln

Vor Beginn des zweiten Funktionstest wurde die Unterseite des Deckels blank poliert, um eventuelle neue Abriebspuren erkennen zu können. Anschließend erfolgte die Befüllung des Probenraumes mit kleineren Partikeln (Durchmesser ca. $0,5\text{ mm}$). Für diese Partikelgröße wurde die Scherzelle nicht konzipiert, jedoch sollte der Test dazu dienen, die beim ersten Versuch entstandenen Schleifspuren besser zu verstehen. Laut Bridgwater [8] ist die Fehlerzone in der die eigentliche Scherung der Partikel auftritt, unabhängig von der Partikelgröße, ungefähr zehn Partikelschichten dick. Liegt die Fehlerzone also im Bereich der Schleifspuren, sollten diese bei diesem Versuch kleiner ausfallen. Die restlichen Randbedingungen blieben unverändert im Vergleich zum ersten Funktionstest. Bereits wenige Umdrehungen nach Beginn des Tests verklemmte sich die Scherzelle und die Sicherheitsab-

schaltung des Frequenzumrichters bei Überstrom des Motors wurde aktiv. Es trat keine Beschädigung an der Kupplung, der Verdreh-Sicherung und der Schraubverbindung zwischen Deckel und Führungsbolzen auf. Die beiden Komponenten der Scherzelle mussten allerdings mit großem Kraftaufwand voneinander gelöst werden. Wie in Abbildung 56a) zu sehen ist, befanden sich Metallspäne im Probenraum. Weiterhin sind in Abbildung 56b) deutliche Riefen in der Seitenwand des Deckels zu erkennen. Offensichtlich bewegte sich eines der Partikel in den Spalt zwischen Deckel und Boden und verursachte die Verklemmung. Somit war der Test nicht erfolgreich, was nicht überraschend ist, da die Scherzelle für diesen Anwendungsfall nicht ausgelegt war.

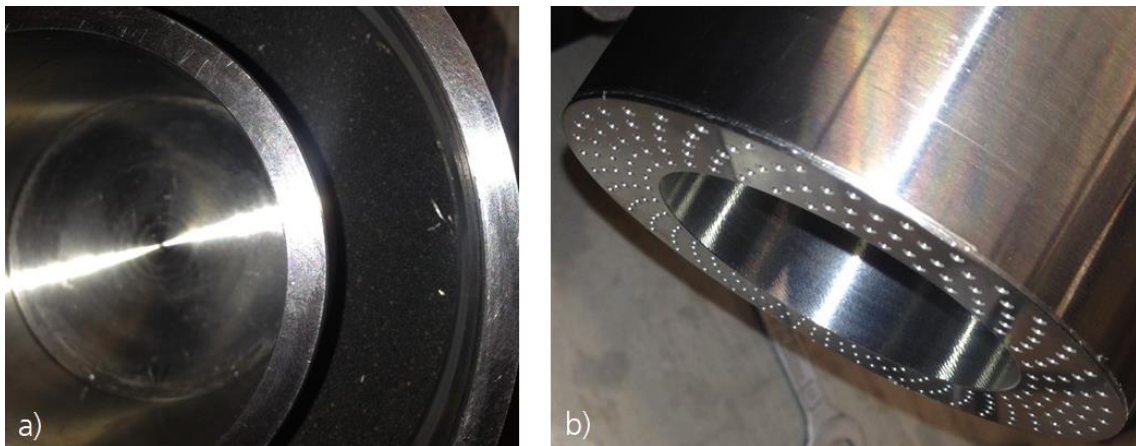


Abbildung 56 Scherzelle nach Funktionstest mit kleinen Partikeln a) Metallspäne im Probenraum b) Riefen im Deckel

7.3 Funktionstest mit mittelgroßen Partikeln

Der dritte Funktionstest mit einer Partikelprobe wurde mit Partikeln durchgeführt, die einen mittleren Durchmesser von ca. $0,97 \text{ mm}$ [25] aufweisen. Diese werden im aktuellen CentRec eingesetzt. Somit ist der Nachweis der Funktionsfähigkeit der Scherzelle mit dieser Partikelgröße von zentralem Interesse. Bei der Versuchsvorbereitung wurden zunächst alle bisherigen Abriebspuren an den Metallteilen der Scherzelle entfernt. Daraufhin erfolgte die Lackierung des Probenraums mit mattschwarzem Sprühlack. Die Farbe ist dabei nicht relevant, durch den Abrieb des Lacks sollen die Stellen, an denen Relativbewegung stattfindet, jedoch optisch besser sichtbar werden. Abbildung 57 zeigt das Ergebnis.

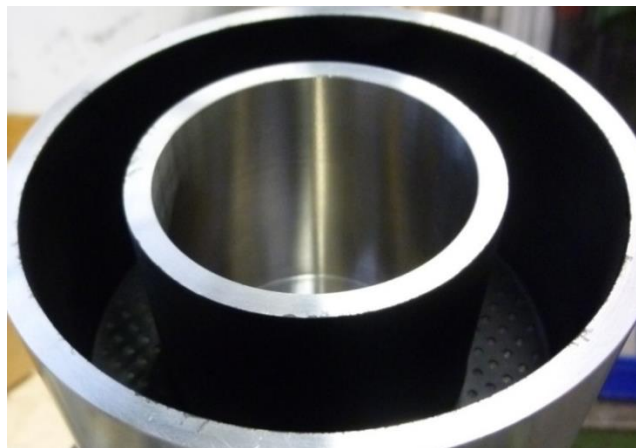


Abbildung 57 schwarz lackierter Probenraum

Nach Versuchsende und Abheben des Deckels bot sich das in Abbildung 58 dargestellte Bild. In einer großen Anzahl Vertiefungen haben sich zwei bis drei Partikel festgesetzt und es sind Schleifspuren an der Metalloberfläche zu erkennen. Analog zum ersten Funktionstest gibt es auch hier Bereiche nach den Vertiefungen, in denen es offenbar keine Relativbewegung zwischen Partikeln und Metall gegeben hat. Diese Bereiche sind jedoch kleiner, und die Schleifspuren im Allgemeinen gleichmäßiger. Das lässt auf einen Zusammenhang zwischen dem Abstand der Vertiefungen untereinander und der Partikelgröße schließen.

Bei der Betrachtung des Probenraumes zeigt sich ein, ebenfalls zum ersten Test analoges, Bild (s. Abbildung 59). Durch die schwarze Lackierung sind die Schleifspuren jedoch detaillierter zu erkennen. Nach der Versuchslaufzeit von ca. 10 min ist der Lack am oberen Rand der Partikelprobe gleichmäßig komplett abgerieben. Darunter liegt eine Zone, in der noch etwas Lack vorhanden ist. Diese Zone geht nach unten hin in eine Zone ohne Relativbewegung über. Je mehr Relativbewegung an einer Stelle stattfindet, desto stärker ist der Lack abgerieben. Nach Abbildung 5 entsteht im oberen Bereich der Partikelprobe eine Zone mit relativ konstanter Partikelbewegung. Das entspricht dem oberen, hellen Bereich in Abbildung 59. Nach unten hin folgt die Scherzone, in der sich die Partikelgeschwindigkeit der unteren Begrenzung nähert (dunkelgrauer Bereich in Abbildung 59). Darunter bewegen sich die Partikel mit der Geschwindigkeit der unteren Begrenzung, es tritt keine Relativbewegung zur Wand mehr auf (schwarzer Bereich in Abbildung 59). Auch diese Beobachtung spricht für die erwartete Funktionsweise der Scherzelle.



Abbildung 58 Deckel nach Funktionstest mit mittelgroßen Partikeln



Abbildung 59 Schleifspuren an der Wand des Probenraumes beim Funktionstest mit mittelgroßen Partikeln

7.4 Inbetriebnahme der Heizung

Die Heizelemente wurden vom Hersteller mit Bohrungen zur Einbringung der Thermoelemente versehen. Diese befinden sich zum einen im Bereich der beheizten Zonen und zum anderen an den Anschlussstellen. Die Thermoelemente wurden in die Bohrungen eingeführt und am Blechmantel befestigt. Abbildung 60 zeigt die Dämmung mit den Heiz- und Thermoelementen. Der elektrische Anschluss der Heizung erfolgte mit keramischen Hochtemperaturlüsterklemmen.



Abbildung 60 Dämmung mit Heiz- und Thermoelementen

Der erste Funktionstest erfolgte ohne Scherzelle, der Versuchsaufbau ist in Abbildung 60 dargestellt. Die Temperatur der Heizelemente wurde schrittweise bis auf den Auslegungswert von $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ hochgefahren. Der Temperaturverlauf über die Versuchsdauer ist in Abbildung 61 aufgezeichnet. Die Differenz zwischen oberem und unterem Grenzwert betrug jeweils 30 K , bei der höchsten Stufe jedoch 50 K . Der Grund dafür ist die, aufgrund des höheren Temperaturgradienten, schnellere Abkühlung der Heizelemente. Dadurch kann die Anzahl der Schaltzyklen verringert werden. Jede Temperaturstufe wurde für einige Minuten gehalten. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu ermöglichen, sind in Abbildung 61 nur die Heizelemente mit der höchsten und der niedrigsten Temperatur dargestellt. Der Temperaturunterschied liegt in der Streuung des elektrischen Widerstands begründet. Zusätzlich zum Temperaturverlauf über die gesamte Versuchsdauer sind die Verläufe bei den verschiedenen Temperaturstufen aufgezeichnet. Die Vergleichbarkeit wird durch konstante Temperatur- und Zeitintervalle gewährleistet. Aufgrund der Geschwindigkeit der Temperaturzunahme der Heizzonen ist ein Überspringen über den oberen Grenzwert zu sehen, dieses nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Weiterhin ist ein Ansteigen der Anzahl an Schaltzyklen zu erkennen. Abbildung 62 zeigt den Blick in den Innenraum der Dämmung bei zunehmender Temperatur.

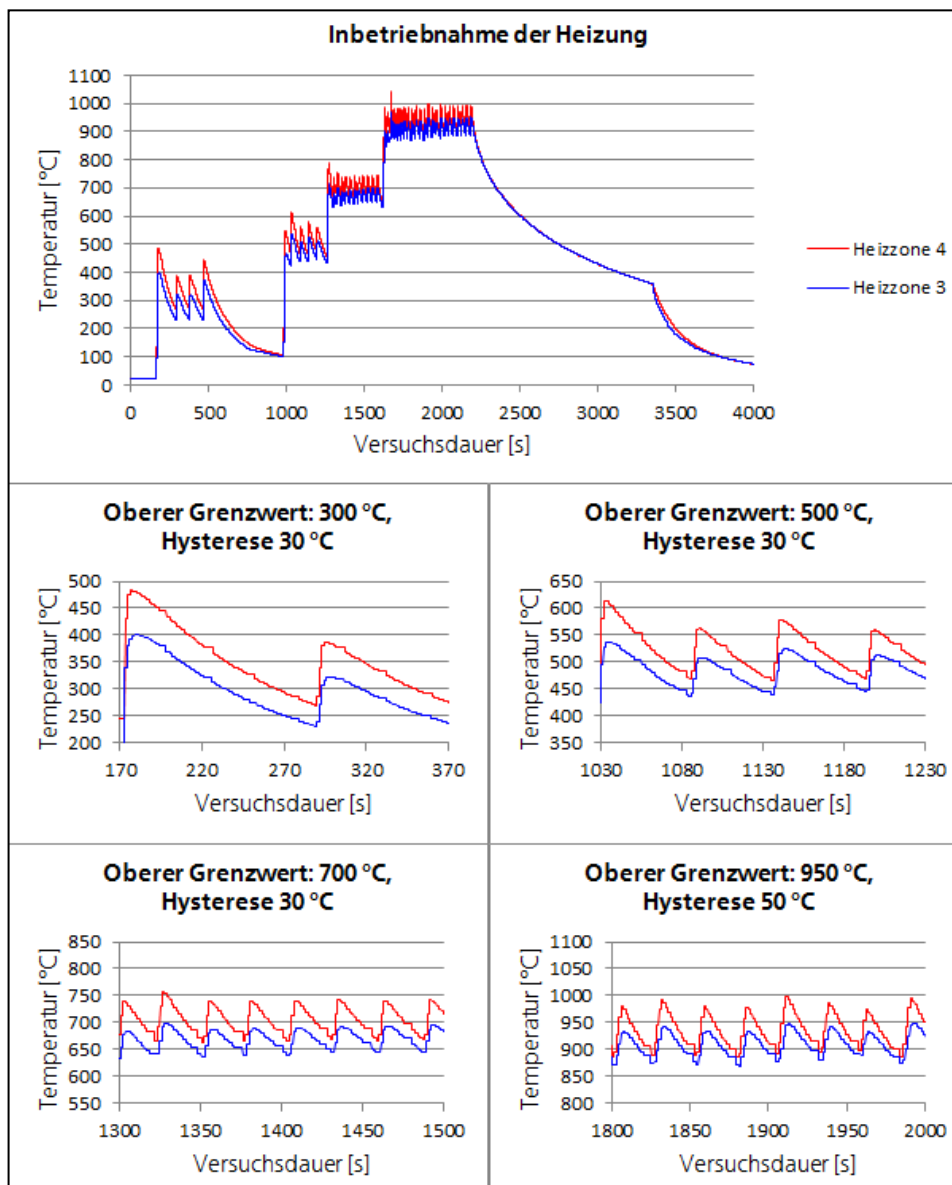


Abbildung 61 Temperaturverlauf der Heizzonen bei der Inbetriebnahme der Heizung

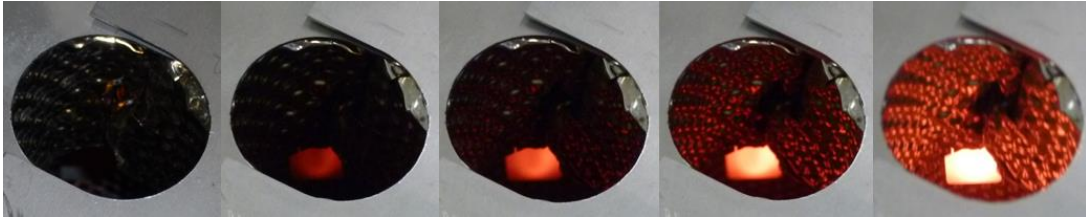


Abbildung 62 Blick in den Innenraum der Dämmung bei steigender Temperatur

Am Ende des Tests wurde die Heizung ausgeschaltet und gegen wieder einschalten gesichert. Daraufhin erfolgte die Abkühlung der Vorrichtung durch Konvektion. Sobald die Temperatur der Heizzonen unter $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ gefallen waren, wurde die Dämmung geöffnet, was ein schnelleres Abkühlen bis auf Raumtemperatur zur Folge hatte. An der Dämmung waren nach dem Versuch keine Beschädigungen zu sehen. Die einzige Veränderung stellte die zu erwartende Entstehung von Anlassfarben dar (s. Abbildung 63).



Abbildung 63 Anlassfarben nach Inbetriebnahme der Heizung

7.5 Inbetriebnahme der Scherzelle bei erhöhter Temperatur

Im nächsten Schritt wurde die Versuchsvorrichtung komplett aufgebaut, das heißt die beiden Halbschalen der Dämmung wurden um die Scherzelle herum aufgebaut. Zusätzlich befand sich eine Partikelprobe im Probenraum, eine Drehbewegung des Motors fand dahingegen noch nicht statt. Das Ziel des Versuchs war es, die Scherzelle auf $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufzuheizen und an dieser Stelle einen quasi-stationären Zustand zu erreichen. Abbildung 64 zeigt die Temperaturverläufe der Scherzelle und der Heizung am Beispiel eines Heizelementes. Der Sollwert der Heiztemperatur wurde zu Beginn auf $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingestellt und anschließend auf $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht. Nachdem eine sichtbare Verringerung der Steigung der Temperaturkurve der Scherzelle eintrat, wurde die Heiztemperatur auf $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ gesteigert. Nach Annäherung der Scherzellentemperatur an den Sollwert erfolgte die Variierung der Grenzwerte der Heiztemperaturen mit dem Ziel, eine konstante Temperatur der Scherzelle zu erreichen. Bei einem oberen Grenzwert von $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Hysterese konnte die Scherzellentemperatur für ca. eine Stunde stabil gehalten werden. Der thermisch stationäre Zustand war zu diesem Zeitpunkt noch nicht erreicht, was an den immer noch steigenden Außentemperaturen an der Dämmung zu erkennen war. Die Änderung der Scherzellentemperatur wurde für den Versuchsbetrieb jedoch als ausreichend gering bewertet.

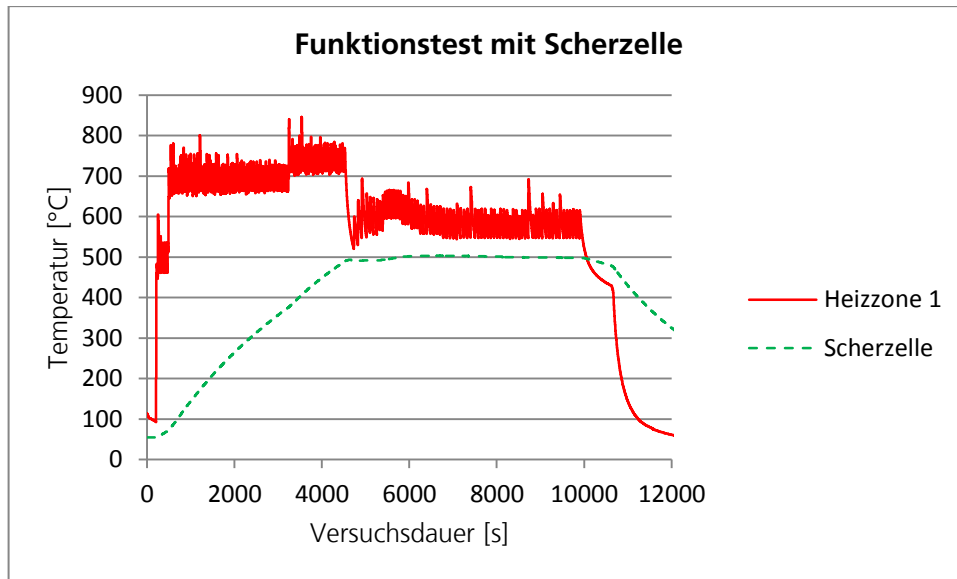


Abbildung 64 Funktionstest: Erhitzung der Scherzelle

Nach dem Abschalten der Heizung wurde die Dämmung geöffnet. Der Zeitpunkt ist in Abbildung 64 als deutlicher Knick im Temperaturverlauf des Heizelementes zu sehen. Durch den Wärmeeintrag veränderte die Oberfläche der Scherzelle die Farbe, wie in Abbildung 65 dargestellt. Ansonsten gab es optisch keine Veränderungen. Die beiden Komponenten der Scherzelle ließen sich problemlos trennen und das Gleiten des Führungsbolzens durch die Aussparung im Querträger war weiterhin möglich.



Abbildung 65 Scherzelle nach der Erhitzung

Daraufhin wurde der Motor eingeschaltet und die Scherzelle im heißen Zustand gedreht. Nach einigen wenigen Umdrehungen hatten sich die beiden Bauteile jedoch festgesetzt. Dem war ein helles, metallisches Schleifgeräusch vorausgegangen. Daraufhin musste die Vorrichtung erst wieder auf Raumtemperatur abkühlen, um eine sichere Handhabung zu gewährleisten.

Nach der Demontage der Scherzelle waren deutliche Riefen im Metall zu erkennen, die in Abbildung 66 dargestellt sind. Diese befanden sich sowohl an den Wänden des Probenraumes, als auch am Deckel. Bei Betrachtung des Probenraumes fallen an der Außenwand zwei Riefen auf, zum einen an der Oberkante der Partikelschicht und zum anderen knapp unterhalb des oberen Randes (s. Abbildung 66a)). Analog dazu sind an der Außenseite des Deckels ebenfalls zwei Riefen zu sehen (s. Abbildung 66c)). An den Innenseiten der Bauteile ist jeweils nur eine Riefe zu erkennen

(s. Abbildung 66b) und d)). Die unteren Schleifspuren wurden vermutlich durch die Partikel verursacht. Bei den oberen ist ein punktueller Kontakt zwischen den Metallteilen wahrscheinlicher. Dieser könnte durch den Wärmeverzug der Bauteile zustande gekommen sein. Die Beschädigungen verhinderten auch im abgekühlten Zustand die Rotation der Teile gegeneinander.

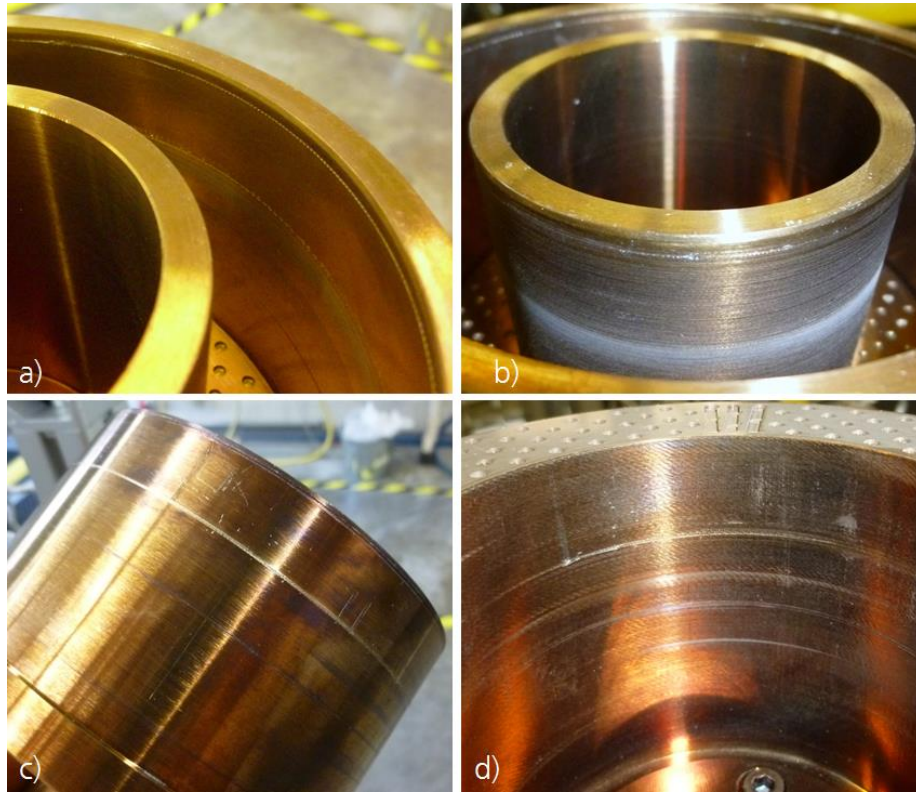


Abbildung 66 Riefen in der Scherzelle a) Außenwand des Probenraums, b) Innenwand des Probenraums, c) Außenseite des Deckels, d) Innenseite des Deckels

Nach dem negativen Ausgang des ersten Funktionstests der Scherzelle bei erhöhter Temperatur wurde ein neuer Ansatz gewählt. Die Scherzelle sollte schon während des Aufheizens rotieren. Dazu mussten allerdings zunächst die Riefen und Erhebungen, die in Abbildung 66 sichtbar sind, entfernt werden. Aufgrund des ungewissen Ausgangs des Tests wurde die Kupplung nur gerade so fest angezogen, dass die Scherzelle rotiert. Bei einem eventuellen Verkanten dreht somit die Kupplung durch und eine Beschädigung der Scherzelle wird verhindert. Ansonsten blieb der Versuchsaufbau unverändert.

Als die Scherzelle eine Temperatur von ca. $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht hatte, kam es erneut zum Stillstand der beiden Bauteile. Die anschließende Untersuchung der Teile ergab, dass sich erneut Riefen gebildet hatten, deren Position denjenigen in Abbildung 66 sehr ähnlich war. Die stärkste Ausprägung hatten die Riefen an der Innenseite des Deckels, bzw. der Oberkante der Innenwand des Probenraums (entspricht Abbildung 66b) und d)). Daraus wurde geschlussfolgert, dass ein Winkelversatz der Rotationsachsen von Deckel und Boden für das Verkanten verantwortlich sein könnte. Zur Behebung dieses Problems erfolgte eine Anpassung der Geometrie des Deckels. Von der Innen- und Außenwand wurden jeweils $0,5\text{ mm}$ abgedreht, beginnend 5 mm oberhalb der Unterkante. Das Ziel war eine gleichbleibende Zentrierung bei Zulassung eines größeren Winkelversatzes. Abbildung 67 zeigt einen Ausschnitt der Schnittdarstellung des Deckels, aus der die Abmessungen der Geometrieanpassung entnommen werden können.

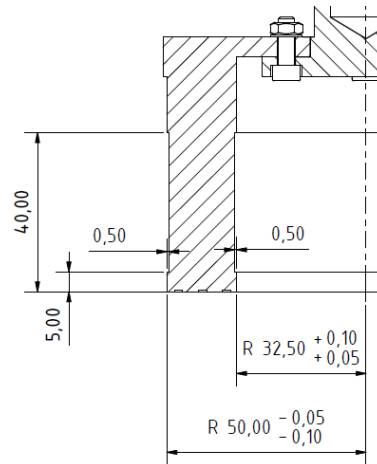


Abbildung 67 Anpassung der Geometrie des Deckels

Nun wurde der zweite Test mit ansonsten unveränderten Bedingungen wiederholt. Das Ergebnis war das gleiche, bei einer Scherzellentemperatur von ca. $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ war keine Rotation mehr möglich. Auf den abgedrehten Flächen waren allerdings keine Schleifspuren mehr zu erkennen.

Zur Abklärung, ob die Schwierigkeiten ausschließlich an der Partikelfüllung liegen, erfolgte daraufhin ein Versuch mit leerem Probenraum. Dazu wurde die Entlastungsvorrichtung dergestalt arretiert, dass die Eintauchtiefe des Deckels in den Boden den vorherigen Versuchen entsprach. Der Versuchsablauf blieb wiederum unverändert. Dieses Mal wurde eine Scherzellentemperatur von ca. $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht, bevor die Scherzelle zum Stillstand kam. In kaltem Zustand funktioniert die Scherzelle über lange Zeit problemlos, deshalb besteht die Möglichkeit, dass in diesem Fall die Verklemmung der beiden Bauteile am Wärmeverzug aufgrund inhomogener Temperaturverteilung liegt.

Zur Überprüfung dieser Theorie wurde ein neuer Versuch mit dem gleichen Aufbau gestartet. Dabei wurden bei stehendem Motor steigende Scherzellentemperaturen angefahren und diese über mehrere Minuten gehalten. In dieser Zeit sollte sich die Temperaturverteilung in der Scherzelle homogenisieren und Verformungen der Bauteile durch unterschiedliche Temperatur ausgeschlossen werden. Erst dann erfolgte das Einschalten des Motors. Der Abstand zwischen den Temperaturen betrug jeweils ca. $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, beginnend bei $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Auf den ersten beiden Stufen war die Rotation der Bodengruppe gegen den Deckel möglich, bei $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ kam es nach wenigen Minuten erneut zum Stillstand der Scherzelle.

Dem Stillstand ging immer ein lautes Schleifgeräusch voraus, das jedoch nicht konstant wahrzunehmen war. Es trat zyklisch mit der Rotation auf. Durch das vorhergehende Erhitzen der Scherzelle auf $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ besteht die Möglichkeit, dass sich die Formtoleranzen der beiden Komponenten der Scherzelle dauerhaft verändert haben. In diesem Fall ist die Rundheit der Teile ausschlaggebend. Zur Abklärung wurden die Bauteile in eine Drehmaschine eingespannt und mit einer Messuhr vermessen. Die Abweichungen lagen bei beiden Teilen im Bereich von $0,1\text{ mm}$ bis $0,2\text{ mm}$ und somit deutlich über dem Wert vor der Erhitzung (vgl. Abbildung 76).

Zur Verbesserung der Rundheit wurde daraufhin von der Innen- und Außenwand des Deckels und des Probenraums jeweils $0,1\text{ mm}$ abgedreht.

Es folgte erneut der bereits beschriebene Versuch mit eingetauchtem Deckel und ohne Partikel. Wiederum kam die Scherzelle bei einer Temperatur von $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ zum Stillstand, allerdings konnte die Betriebsdauer um einige Minuten erhöht werden. Bei der Rotation der Bodengruppe gegen den Deckel fiel auf, dass deutliche Vibrationen des Deckels auftraten. Diese äußerten sich in dem aus vorherigen Versuchen bekannten, lauten Schleifgeräusch. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass der Deckel zwischen den Wänden des Probenraums hin- und herschwingt. Diese Schwingungen

werden durch die Berührung der vertikalen Flächen des Deckels und des Probenraums verursacht. Abbildung 68 zeigt die dabei entstandene raue Oberfläche an der Außenseite des Deckels. Durch die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit kam es schließlich erneut zum Stillstand der Scherzelle.

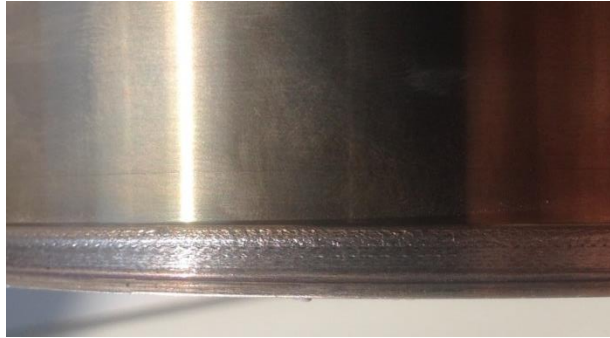


Abbildung 68 raue Oberfläche des Deckels an der Kontaktfläche zur Bodengruppe

Die Zentrierung des Deckels zur Bodengruppe sollte über das Eintauchen der beiden Bauteile ineinander realisiert werden. Diese Methode wurde jedoch schließlich als Ursprung der beschriebenen Probleme vermutet. Zur Klärung dieser Vermutung erfolgte die Durchführung eines neuen Versuchs. Dafür wurde der Probenraum randvoll mit Partikeln gefüllt und der Deckel darauf gesetzt. Die Positionierung erfolgte über die Justierung der Entlastungsvorrichtung und des Querträgers. Um zu sehen, ob bei diesem Versuchsaufbau Partikel aus dem Probenraum nach draußen gelangen können, wurde die Scherzelle zunächst bei Raumtemperatur und bei offener Dämmung in Betrieb genommen. Direkt nach Einschalten des Motors hob sich der Deckel kurz etwas an, sodass einige wenige Partikel nach draußen gelangten. Danach senkte sich der Deckel wieder ab, sodass seine Unterkante ca. 2 mm unterhalb des oberen Randes des Probenraumes lag. Bei diesem Niveau blieb es daraufhin und es gelangten keine Partikel mehr nach draußen. Dieses Verhalten lässt auf eine anfängliche Inhomogenität der Partikelschüttung und eine Änderung der Schüttgutdichte schließen.

Im Anschluss wurde die Scherzelle bei Rotation erfolgreich bis auf die geplante Betriebstemperatur von 500 °C aufgeheizt. Der Vorgang dauerte ca. 2 h. Nach Abkühlen der Scherzelle auf Raumtemperatur konnte sie geöffnet werden und es wurde erkannt, dass auch im Betrieb keine Partikel aus dem Probenraum nach draußen gelangt waren. Weiterhin war eine deutliche Staubentstehung zu sehen (s. Abbildung 69 bis Abbildung 72). An den Wänden des Probenraums waren erneut Abriebspuren entstanden, die Aufschluss über die Lage und räumliche Ausdehnung der Scherzone liefern (s. Abbildung 71 und Abbildung 72). Die Übergänge zwischen mitrotierender Partikelschicht, Scherzone und stillstehender Partikelschicht sind fließend und nicht genau definierbar. Jedoch gibt das Lineal in Abbildung 72 Aufschluss über die ungefähre räumliche Ausdehnung der Scherzone.



Abbildung 69 Scherzelle nach erfolgreicher Inbetriebnahme

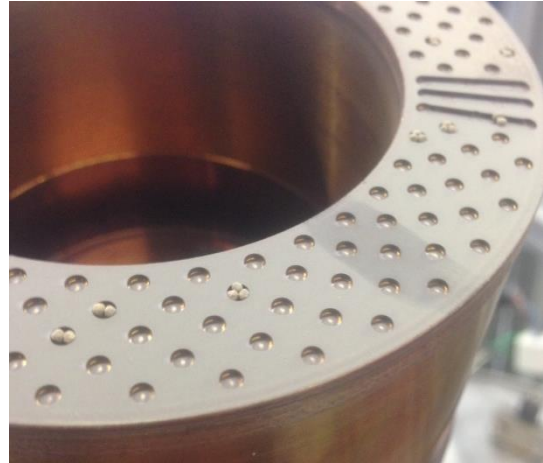


Abbildung 70 Staubschicht auf der Unterseite des Deckels

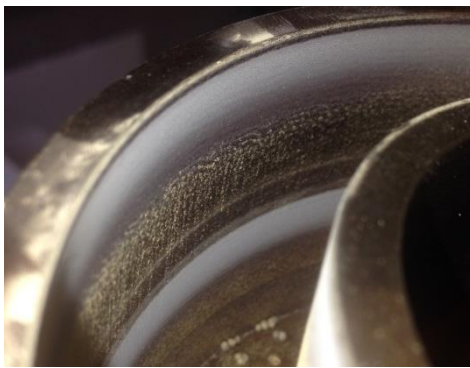


Abbildung 71 Abriebspuren am äußeren Rand des Probenraums



Abbildung 72 Räumliche Ausdehnung der Scherzone

7.6 Überprüfung der Aufheizzeit

Die Heizung und die Dämmung der Scherzelle wurden anhand der mit FEM-Analysen ermittelten Aufheizzeit der Partikelprobe (s. Kapitel 4) entwickelt. Sie sind für eine maximale Aufheizzeit der Partikelprobe von 1 h auf mindestens 850 °C ausgelegt. Im folgenden Versuch sollen die Ergebnisse validiert werden. Allerdings ist zu beachten, dass der Werkstoff der Scherzelle in der jetzigen Ausführung nur bis 500 °C zugelassen ist. Deshalb kann die Aufheizzeit lediglich bis zu diesem Wert überprüft werden. Für den Versuch wurde der Probenraum bis zum Rand mit Partikeln befüllt und der Deckel aufgesetzt. Da der Probenraum im Betrieb rotiert ist eine direkte Messung der Partikeltemperatur nicht möglich. Deshalb befinden sich die Thermoelemente zur Messung der Proben-temperatur im Deckel der Scherzelle. Um den Temperaturunterschied zwischen Partikelprobe und Deckel zu bestimmen, wurden bei diesem Versuch zusätzlich vier Thermoelemente in den Proben-

raum eingebracht und die Daten mit einem externen Messgerät erfasst. Das ist möglich, da für diesen Versuch keine Rotation der Bodengruppe notwendig ist. Die Thermoelemente wurden möglichst mittig und gleichmäßig über den Umfang verteilt eingebracht (s. Abbildung 73).



Abbildung 73 Positionierung der Thermoelemente im Probenraum

Abbildung 74 zeigt die Temperaturverläufe aus der FEM-Simulation der Partikelprobe und dem Versuch im Vergleich. ANSYS berechnet für jeden Zeitschritt den Minimal- und den Maximalwert der Probentemperatur. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit ist der Mittelwert der berechneten Temperaturen dargestellt. Dementsprechend wurden die Temperaturwerte der vier Thermoelemente in der Partikelprobe gemittelt. Die Temperaturerfassung des Deckels der Scherzelle erfolgte dahingegen nur mit einem Thermoelement.

Zu Beginn des Versuchs wurde der obere Grenzwert der Heiztemperatur auf $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingestellt. Der untere Grenzwert lag bei $920\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durch das Überspringen der Heiztemperatur über den oberen Grenzwert ergab sich somit im Mittel eine Heiztemperatur von $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ wie in der Simulation. Das Ziel mit vorliegender Konfiguration der Scherzelle ist eine Partikeltemperatur von $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ für spätere Abriebmessungen. Deshalb wurde die Heiztemperatur reduziert, sobald der Deckel diesen Wert erreicht hatte und anschließend die Temperatur des Deckels konstant gehalten. Ein oberer Grenzwert der Heiztemperatur von ca. $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ Hysterese erwies sich dabei als gute Wahl (s. Temperaturverlauf in Abbildung 74).

Bei Betrachtung der gemessenen Temperatur der Partikelprobe fällt auf, dass diese anfangs deutlich unterhalb der Temperatur des Deckels liegt und sich im weiteren Verlauf des Versuchs immer mehr an die Deckeltemperatur annähert. Am Ende des Versuchs beträgt die Differenz von Deckel- und Probentemperatur ca. $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ und es ist eine geringe Temperaturänderung festzustellen. Somit wurde der thermisch stationäre Zustand noch nicht erreicht, es ist jedoch keine große Änderung der Temperatur mehr zu erwarten. Die Abweichung sollte im stationären Zustand im Bereich von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen.

Die mit Hilfe von ANSYS berechnete Probentemperatur steigt deutlich schneller an. Dieser Umstand lässt sich mit den für die FEM-Simulationen getroffenen Vereinfachungen erklären. Zum einen sind für die Emissionsgrade von Heizelementen, Dämmung und Scherzelle in der Literatur stark schwankende Werte verzeichnet. Die realen Verhältnisse in der Versuchsvorrichtung sind in diesem Fall nicht genau bestimmbar. Zum anderen sind die Dämmeigenschaften der realen Dämmung schlechter, als die der modellierten Dämmung.

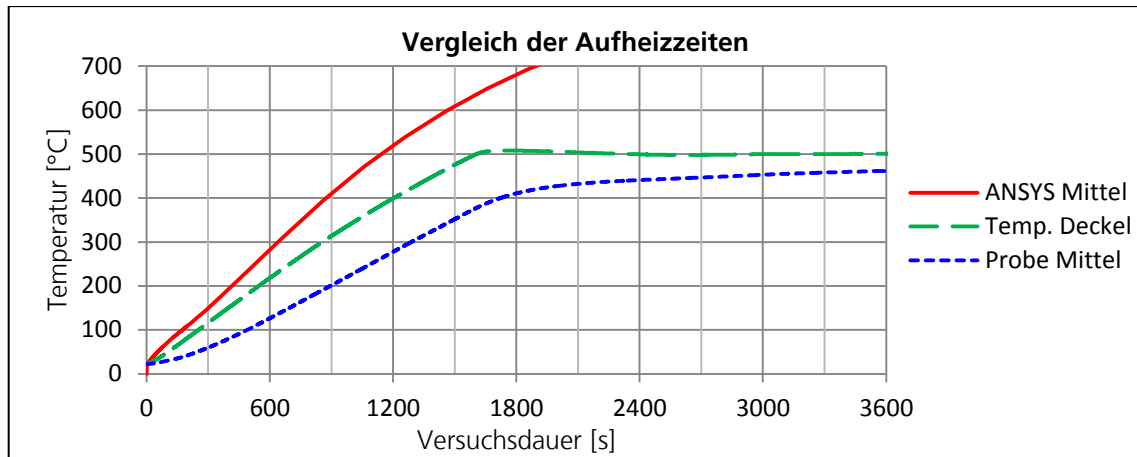


Abbildung 74 Vergleich der simulierten Aufheizzeit mit den gemessenen

7.7 Bewertung der Ergebnisse der Inbetriebnahme

Nach der Inbetriebnahme der Versuchsvorrichtung lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Scherzelle bei Raumtemperatur und mit der Auslegungspartikelgröße prinzipiell funktioniert. Die Schleifspuren an den Wänden des Probenraumes lassen darauf schließen, dass es eine Zone im unteren Bereich der Partikelprobe gibt, in der keine Relativbewegung zwischen Partikeln und Wand stattfindet. Diese Zone geht über in einen Bereich mit starker Relativbewegung direkt unterhalb des Deckels. Die Scherzone befindet sich offensichtlich im Übergangsbereich. Diese Beobachtung deckt sich mit der Theorie (vgl. Kapitel 2.1). Allerdings ist auch zu erkennen, dass sich die Partikel relativ zur Deckelunterseite bewegen. Daraus ergibt sich die Erkenntnis, dass die Maßnahme zur Steigerung der Oberflächenrauigkeit nicht ausreichend ist.

Die Heizung an sich funktioniert ebenfalls, jedoch ist die Temperatursteigerung der Heizelemente im Heizbetrieb derart groß, dass es zu großem Überschwingen des oberen Temperaturgrenzwertes kommt. Das ist vor allem im Temperaturbereich bis ca. 300 °C zu beobachten. Der Grund dafür ist, dass bei der Zwei-Punkt Regelung keine Leistungsregulierung vorgenommen wird. Weiterhin ist die Abtastrate der Messtechnik begrenzt.

Zur Inbetriebnahme der Scherzelle bei erhöhter Temperatur wurden mehrere Versuche durchgeführt. Als erstes wurde die Scherzelle im Stillstand erhitzt und der Motor dann erst angeschaltet. Daraufhin erfolgte das Aufheizen der Vorrichtung bei Rotation. In beiden Fällen kam die Scherzelle nach kurzer Zeit zum Stillstand durch verklemmen. Im Anschluss erfolgte eine Geometrie Anpassung des Deckels und es wurden mehrere Versuche mit und ohne Partikelfüllung gefahren. Ein regelmäßiges Verklemmen der Vorrichtung konnte aber nicht verhindert werden. Letztendlich wurde das Eintauchen des Deckels in den Boden zur Zentrierung der beiden Bauteile der Scherzelle als Ursache erkannt. Tatsächlich ist die Zentrierung des Deckels durch die Entlastungsvorrichtung und den Querträger jedoch ausreichend. Daher muss der Probenraum bis zum Rand mit Partikeln gefüllt sein, um einen zuverlässigen Betrieb bei erhöhten Temperaturen zu gewährleisten. Allerdings trat bei Beginn der Rotation ein Partikelverlust auf, der für die Durchführung von Messungen zu vermeiden ist.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass die tatsächliche Temperatur der Partikelprobe im stationären Zustand um ca. 20 °C bis 30 °C geringer als die im Deckel gemessene Temperatur ist. Außerdem muss die Versuchsvorrichtung einige Zeit bei konstanter Temperatur gehalten werden, um eine relativ konstante Proben temperatur zu erhalten. Das muss bei der Durchführung von Abriebmessungen beachtet werden.

8 Zusammenfassung

In Solarturmkraftwerken mit Zentrifugal-Partikelreceiver werden keramische Partikel als Wärmeträgermedium eingesetzt. Durch Reibung entsteht an den Partikeln im Receiver Abrieb, der zu einem Massenverlust führt. Dieser muss ersetzt werden und ist somit ein Kostenfaktor der relevant für die Wirtschaftlichkeit des Receiverkonzepts ist. Die Datengrundlage bezüglich des Abriebs bei erhöhten Temperaturen ist unzureichend, deshalb sollte in dieser Arbeit eine Versuchsvorrichtung zur Bestimmung des Partikelabriebs in einem Zentrifugal-Partikelreceiver entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen werden.

Als Konzept für die Versuchsvorrichtung wurde eine beheizbare Ringscherzelle gewählt. Damit können die Bedingungen im Receiver abgebildet werden. Die mechanischen Komponenten der Scherzelle wurden konstruiert und durch Festigkeitsberechnungen auf ihre Haltbarkeit überprüft. Für die Auslegung der Heizung und der Wärmedämmung wurden thermische FEM-Analysen durchgeführt. Das Ziel war eine möglichst kurze Aufheizzeit.

Nach Anfertigung der Bauteile erfolgten der Aufbau der Versuchsvorrichtung und der elektrische Anschluss des Motors. Zur Regelung der Heizung wurde ein LabView®-Programm entworfen, das nach dem Prinzip der Zwei-Punkt-Regelung arbeitet. Die benötigten Temperaturwerte stammen von Thermoelementen, die an den Heizelementen angebracht wurden.

Die Inbetriebnahme der Versuchsvorrichtung erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst wurde die Scherzelle bei Raumtemperatur in Betrieb genommen. Dafür wurden Tests mit verschiedenen Partikeldurchmessern durchgeführt. Aufgrund der Abriebspuren an den Wänden des Probenraums konnte die Funktionsweise der Scherzelle mit Partikeln ab ca. 1 mm Durchmesser nachgewiesen werden.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Heizung wurde die Scherzelle mit gefülltem Probenraum bei erhöhter Temperatur in Betrieb genommen. Dabei waren Überarbeitungen an der Geometrie und der Betriebsweise der Versuchsvorrichtung notwendig. Der Grund war ein regelmäßiges Verkleben der Scherzelle mit folgendem Stillstand. Dies konnte durch eine Änderung der Vorgehensweise beim Betrieb der Vorrichtung behoben werden. Da das Eintauchen des Deckels in den Probenraum als Ursache erkannt wurde, musste die Schütthöhe der Partikel bis zum Rand des Probenraums erhöht werden. Somit wird ein Eintauchen des Deckels verhindert und ein Verkleben der Scherzelle tritt nicht mehr auf.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Versuchsvorrichtung erfolgreich in Betrieb genommen werden konnte. Möglichkeiten für Verbesserungen am Teststand oder der Bedienung desselben werden in Kapitel 9 beschrieben.

9 Ausblick

Die Inbetriebnahme der Versuchsvorrichtung wurde in dieser Arbeit abgeschlossen. Die Durchführung von Messungen des Partikelabriebs bei maximal 500 °C ist somit mit der jetzigen Konfiguration der Scherzelle möglich. Für eine vergleichbare Messung der Scherzellentemperatur ist jedoch die Einbringung von kalibrierten Thermoelementen in den Deckel der Scherzelle notwendig. Diese sind bereits vorhanden. Da die Heizung für Probertemperaturen > 850 °C ausgelegt ist, können auch Abriebmessungen bei höherer Temperatur erfolgen. Dafür müssen allerdings die metallischen Komponenten der Scherzelle aus einem entsprechenden, hitzebeständigen Werkstoff (Nickelbasislegierung, Inconel®) neu angefertigt werden.

Da die Messungen mehrere Stunden dauern sollen, wäre ein Betrieb der Versuchsvorrichtung ohne dauerhafte Aufsicht von Vorteil. Dazu sind weiterführende Sicherheitsmaßnahmen vorzusehen. Im aktuellen Zustand kann das Schutzgitter im Betrieb geöffnet werden und die heißen und/oder Spannungsführenden Bauteile (z. Bsp. die Anschlussstelen der Heizelemente) können berührt werden. Deshalb sind zumindest hinweisende Sicherheitsvorkehrungen in Form von Warnhinweisen anzubringen. Besser wäre ein Schalter, der beim Öffnen des Schutzgitters die gesamte Vorrichtung stromlos schaltet. Verbrennungsgefahr besteht dann allerdings weiterhin.

Bei der Arbeit mit dem Teststand während der Inbetriebnahme wurden noch einige Verbesserungsmöglichkeiten erkannt. Als nächstes könnte die Lagerung der Antriebswelle überarbeitet werden. Aufgrund des zwangsläufig vorhandenen Lagerspiels in den beiden Gleitlagern kommt es, in Verbindung mit der Tatsache, dass die Metallbalgkupplung Querkräfte übertragen kann, zu Abweichungen im Rundlauf der Bodengruppe. Diese führen dazu, dass die Scherzelle bei hohen Temperaturen mit eingetauchtem Deckel nicht funktionsfähig ist. Eine Lagerung mit Wälzlagern in Verbindung mit einer Kardanwelle würde an dieser Stelle vermutlich besser funktionieren.

Weiterhin tritt an der Unterseite des Deckels, trotz der Erhöhung der Oberflächenrauigkeit durch die Vertiefungen, Relativbewegung zwischen Partikeln und Metall auf. Die Vertiefungen an sich unterbinden die Bewegung, allerdings nur auf einer kleinen Fläche. Durch Erhöhung der Anzahl der Vertiefungen kann die Situation demnach verbessert werden. Auch die Form der Vertiefungen kann überarbeitet werden. Zurzeit setzen sich einige Partikel in den runden Einfräsungen fest. Bei radialen Nuten über die ganze Ringbreite besteht diese Problematik nicht. Eine Möglichkeit für die Realisierung der neuen Version ist die Herstellung eines Ringes, der mit Einschraubverbindungen an der Unterseite des Deckels befestigt wird. Dadurch müsste der Deckel nicht neu angefertigt werden.

Des Weiteren entstehen durch die Zwei-Punkt-Regelung der Heizung sehr hohe Temperaturgradienten, welche die Lebensdauer der Heizelemente bzw. der daran angebrachten Thermoelemente beeinträchtigen könnten. Außerdem werden durch die häufigen Schaltzyklen die Schaltrelais der schaltbaren Steckdosen des mobilen Messplatzes stark beansprucht. Da die Heizelemente zudem nur einen geringen Teil der Versuchszeit tatsächlich eingeschaltet sind, ist die Leistungsaufnahme auf die volle Versuchszeit bezogen wesentlich geringer. Deshalb würde an dieser Stelle eine Leistungsregelung (z. Bsp. Leistungssteller mit Phasenanschnitt) Sinn ergeben.

Als nächstes sollte noch eine reproduzierbare und einfache Methode zur Befüllung des Probenraums entwickelt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] BP, "Statistical Review of World Energy," 2015.
- [2] IPCC, "Climate Change 2014 Synthesis Report," 2014.
- [3] W. Wu, L. Amsbeck, R. Buck, R. Uhlig and R. Pitz-Paal, "proof of concept test of a centrifugal particle receiver," in *SolarPACES 2013*, 2013.
- [4] N. Siegel, M. Gross, C. Ho, T. Phan and J. Yuan, "Physical properties of solid particle thermal energy storage media for concentrated solar power applications," in *SolarPACES2013*, Las Vegas, 2013.
- [5] L. Amsbeck, „Keramische Partikel als Wärmeträger der nächsten Generation in Solartumanlagen,“ in *17. Kölner Sonnenkolloquium*, Köln, 5.6.2014.
- [6] G. Posselt, Diplomarbeit: Entwicklung eines Teststandes zur Bestimmung von Partikelabrieb in solaren Partikelreceptoren, Stuttgart, 2015.
- [7] D. Schulze, Pulver und Schüttgüter 3. Auflage, Springer Vieweg, 2014.
- [8] J. Bridgwater, Handbook of Powder Technology, Chapter 3: Particle Breakage due to Bulk shear, Cambridge: Elsevier B.V., 2007.
- [9] VDI e.V., VDI-Wärmeatlas, Springer-Vieweg, 2013.
- [10] H. Theumert und B. Fleischer, Entwickeln Konstruieren Berechnen, Vieweg, 2007.
- [11] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch und J. Voßiek, Roloff/Matek Maschinenelemente, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [12] Deutsche Edelstahlwerke GmbH, „dew-stahl,“ 1 August 2007. [Online]. Available: http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4923_de.pdf. [Zugriff am 5 November 2015].
- [13] LOB GmbH, „lob-gmbh,“ 2009. [Online]. Available: <http://www.lob-gmbh.de/de/werkstoffe/1.4404.html>. [Zugriff am 5 November 2015].
- [14] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder und W. A. Wall, Technische Mechanik 1 - Statik, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [15] G. Routschka, Feuerfeste Werkstoffe, Vulkan Verlag, 2007.
- [16] R. Plagge, „Mikroporöse Hochleistungsdämmstoffe,“ in *Fachkongress EnergieEffizientes Bauen 2014*, Augsburg, 2014.
- [17] Becker Insulation GmbH, Technisches Datenblatt MB1000 mikroporöse Isolierplatte, DE-49626 Bippin.

- [18] „www.bachrc.de“, Bach Resistor Ceramics GmbH, [Online]. Available: <http://www.bachrc.de/produkte/keramische-heizelemente/index.html>. [Zugriff am 2 Oktober 2015].
- [19] Bach Resistor Ceramics GmbH, „www.bachrc.de, Produkte, keramische Heizelemente, Strahlungsheizer“, [Online]. Available: <http://www.bachrc.de/produkte/keramische-heizelemente/strahlungsheizer/index.html>. [Zugriff am 2 Oktober 2015].
- [20] Bach Resistor Ceramics GmbH, „www.bachrc.de, Produkte, keramische Heizelemente, Strahlungsheizer, technische Daten, Datenblatt STR 210“, 27 Juni 2012. [Online]. Available: http://www.bachrc.de/cms/upload/produkte/keramische_heizelemente/strahlungsheizer/downloads/Datenblatt-STR-210.PDF. [Zugriff am 8 Januar 2016].
- [21] Bach Resistor Ceramics, „www.bachrc.de, Produkte, keramische Heizelemente, Strahlungsheizer, technische Daten, Datenblatt STR 228“, 23 November 2012. [Online]. Available: http://www.bachrc.de/cms/upload/produkte/keramische_heizelemente/strahlungsheizer/downloads/Datenblatt-STR-228.PDF. [Zugriff am 8 Januar 2016].
- [22] BALLUFF GmbH, 18 Juli 2015. [Online]. Available: http://www.balluff.com/balluff/MDE/de/produkte/product_detail.jsp#/223509. [Zugriff am 28 Januar 2016].
- [23] WIKA Alexander Wiegand SE & Co KG, „Einsatz von Thermoelementen, WIKA Datenblatt IN 00.23“, März 2014. [Online]. Available: http://de-de.wika.de/upload/DS_IN0023_de_de_51541.pdf. [Zugriff am 13 Januar 2016].
- [24] SEW-EURODRIVE GmbH & C Kg, „www.sew-eurodrive.de“, [Online]. Available: https://www.sew-eurodrive.de/dienstleistungen/daten_dokumente/daten_dokumente.html.
- [25] Saint Gobain Proppants, *Sintered Bauxite Data Sheet*, 2004.
- [26] Bach Resistor Ceramics GmbH, „Downloadbereich, technische Daten, Strahlungsheizer“, 27 Juni 2012. [Online]. Available: http://www.bachrc.de/cms/upload/produkte/keramische_heizelemente/strahlungsheizer/downloads/Datenblatt-STR-210.PDF. [Zugriff am 23 November 2015].
- [27] KLEIBER Infrared GmbH, „KLEIBER Infrared, Anwendungen, Emissionsgrade“, KLEIBER Infrared GmbH, 2015. [Online]. Available: <http://www.kleiberinfrared.de/index.php/de/amanwendungen/emissionsgrade.html>. [Zugriff am 24 November 2015].
- [28] CARBO Ceramics Inc., *CARBOHSP technical data sheet*, Houston, Texas, 2015.
- [29] Silca GmbH, „Silca HT, Produkte, SILCAPOR High 1050 Datenblatt“, [Online]. Available: http://www.silca-online.de/pdf/silca_31-6A.pdf. [Zugriff am 24 November 2015].
- [30] BACH Resistor Ceramics GmbH, „Bach RC, Technologie, Materialeigenschaften“, BACH Resistor Ceramics GmbH, [Online]. Available: <http://www.bachrc.de/technologie/technologie-vorteile/index.html>. [Zugriff am 24 November 2015].

10 Anhang

10.1 Konstruktionszeichnungen

Lfd. Nr.	Bauteil	Seite
1	Gesamtdarstellung des Teststands (ohne Schutzgitter) mit Stückliste	79
2	Deckel der Scherzelle	80
3	Führungsbolzen	81
4	Querträger der Verdreh-Sicherung	82
5	Hebel der Entlastungsvorrichtung	83
6	Lagersitz der Entlastungsvorrichtung	84
7	Linke Halbschale der Dämmung	85
8	Rechte Halbschale der Dämmung	86
9	Blechmantel der Dämmung	87
10	Zuschnitt der mikroporösen Dämmplatten	88
11	Tischkonstruktion	89
12	Schutzgitter	90

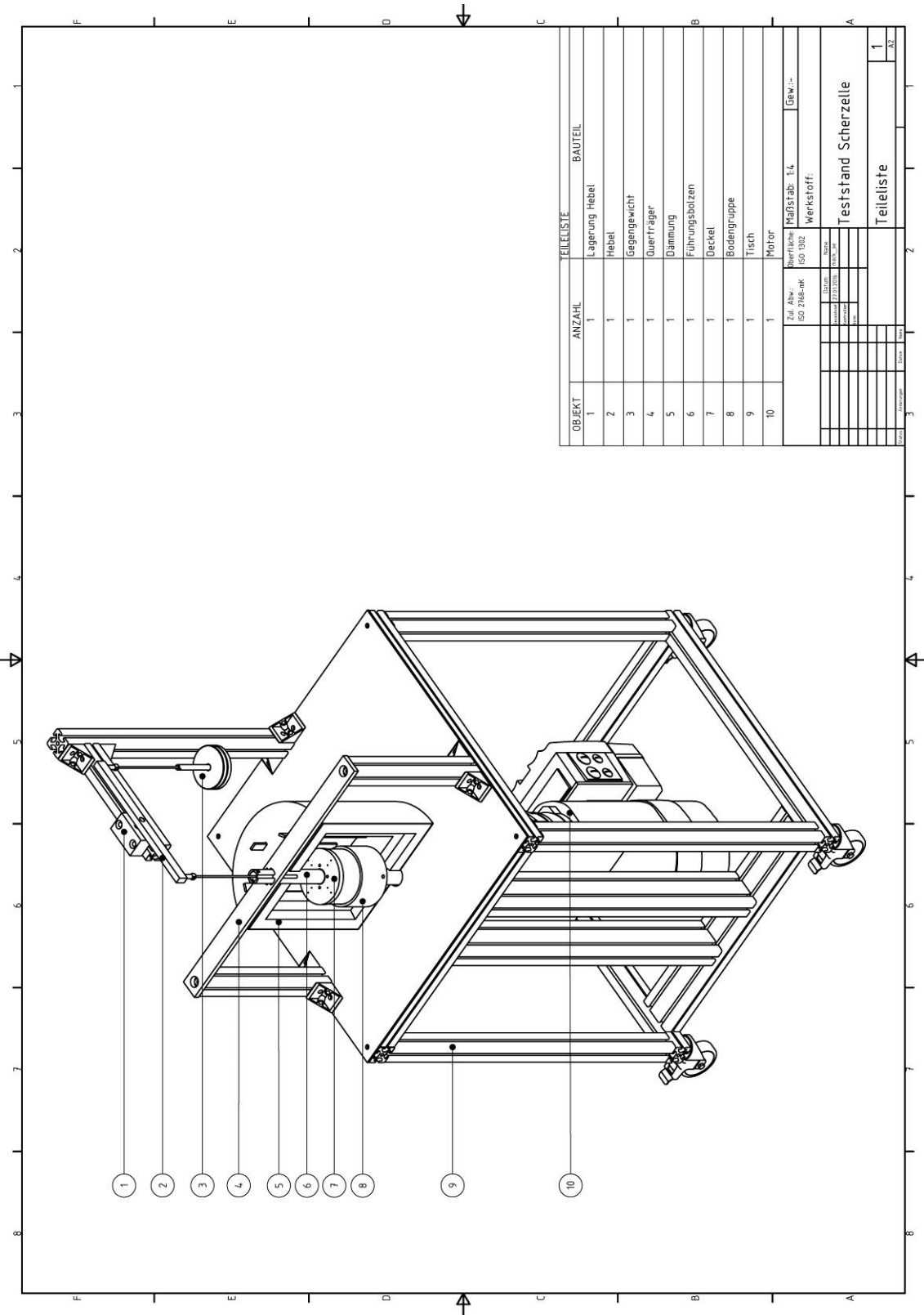


Abbildung 75 Stückliste des Teststands







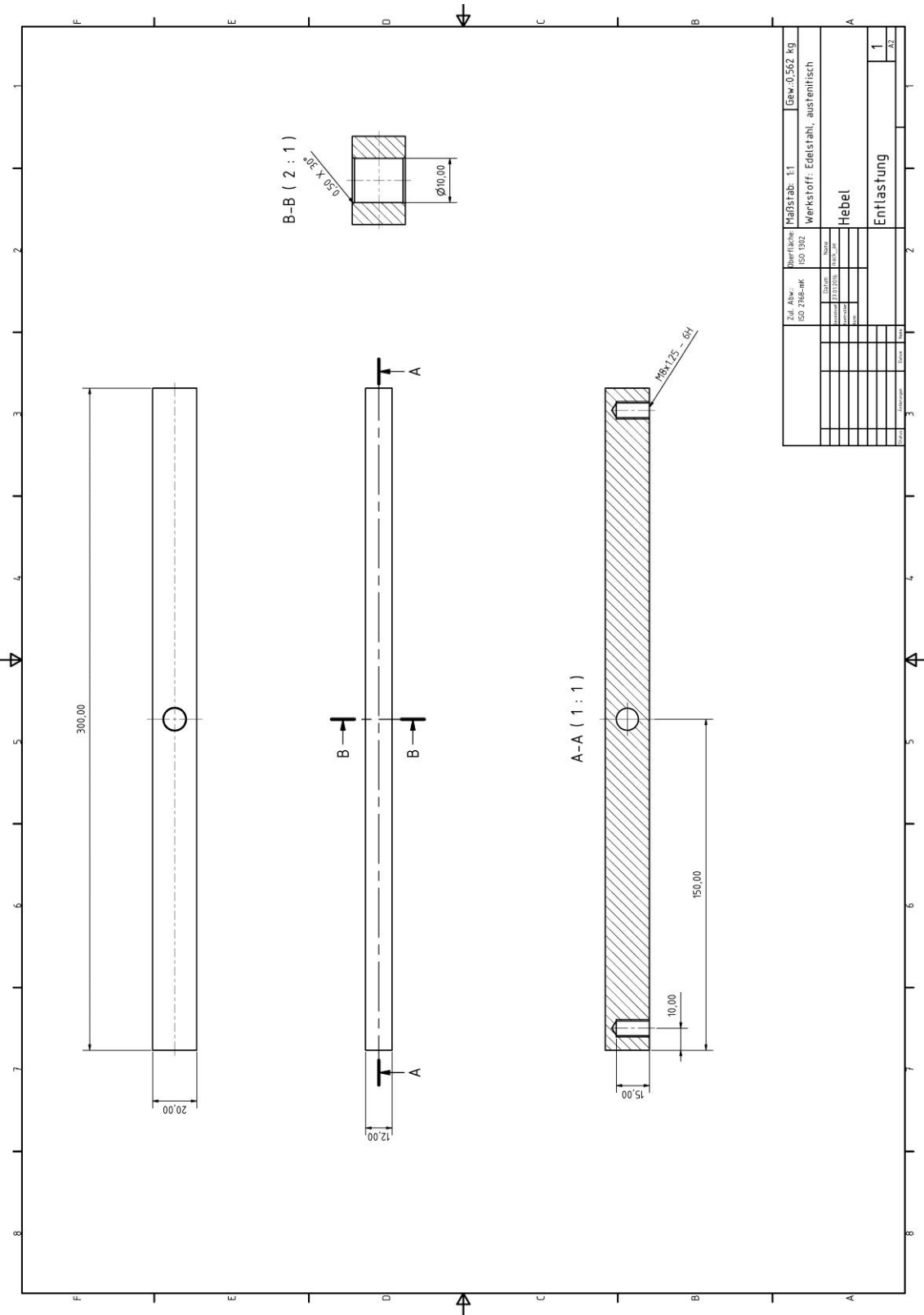
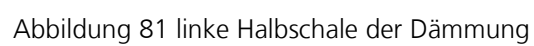


Abbildung 79 Konstruktionszeichnung Entlastungshebel





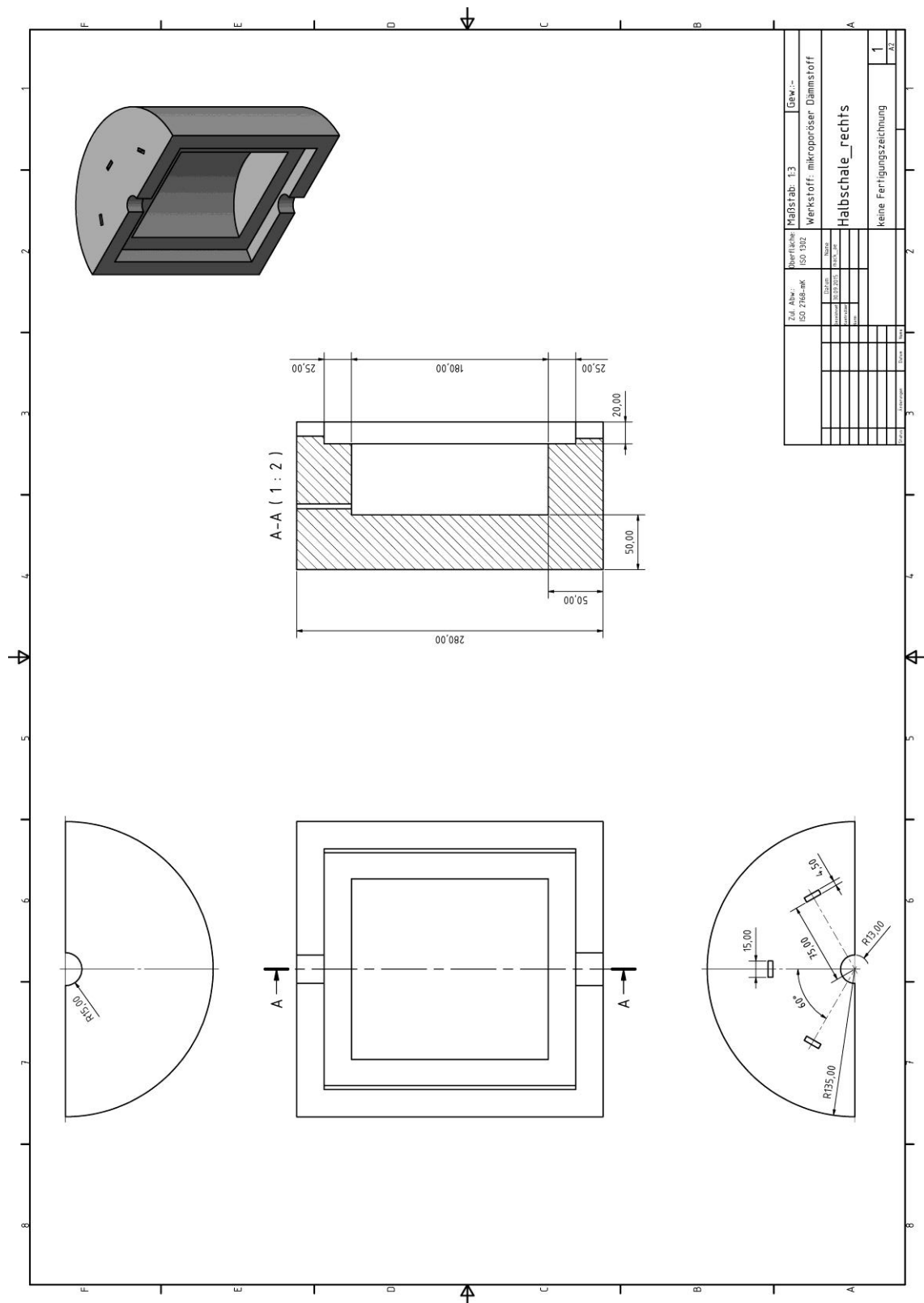


Abbildung 82 rechte Halbschale der Dämmung

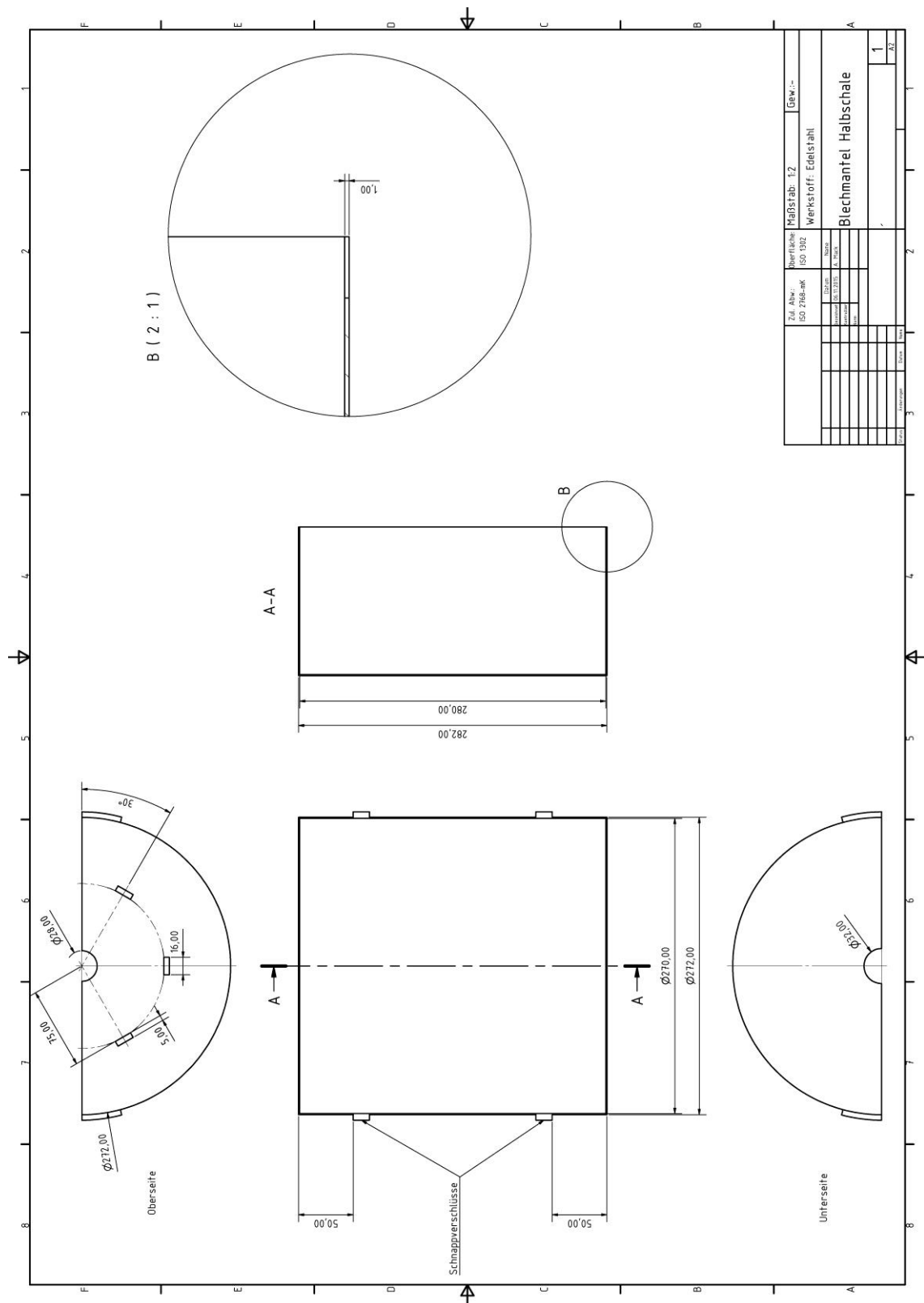


Abbildung 83 Blechmantel der Dämmung, zwei gleiche Halbschalen

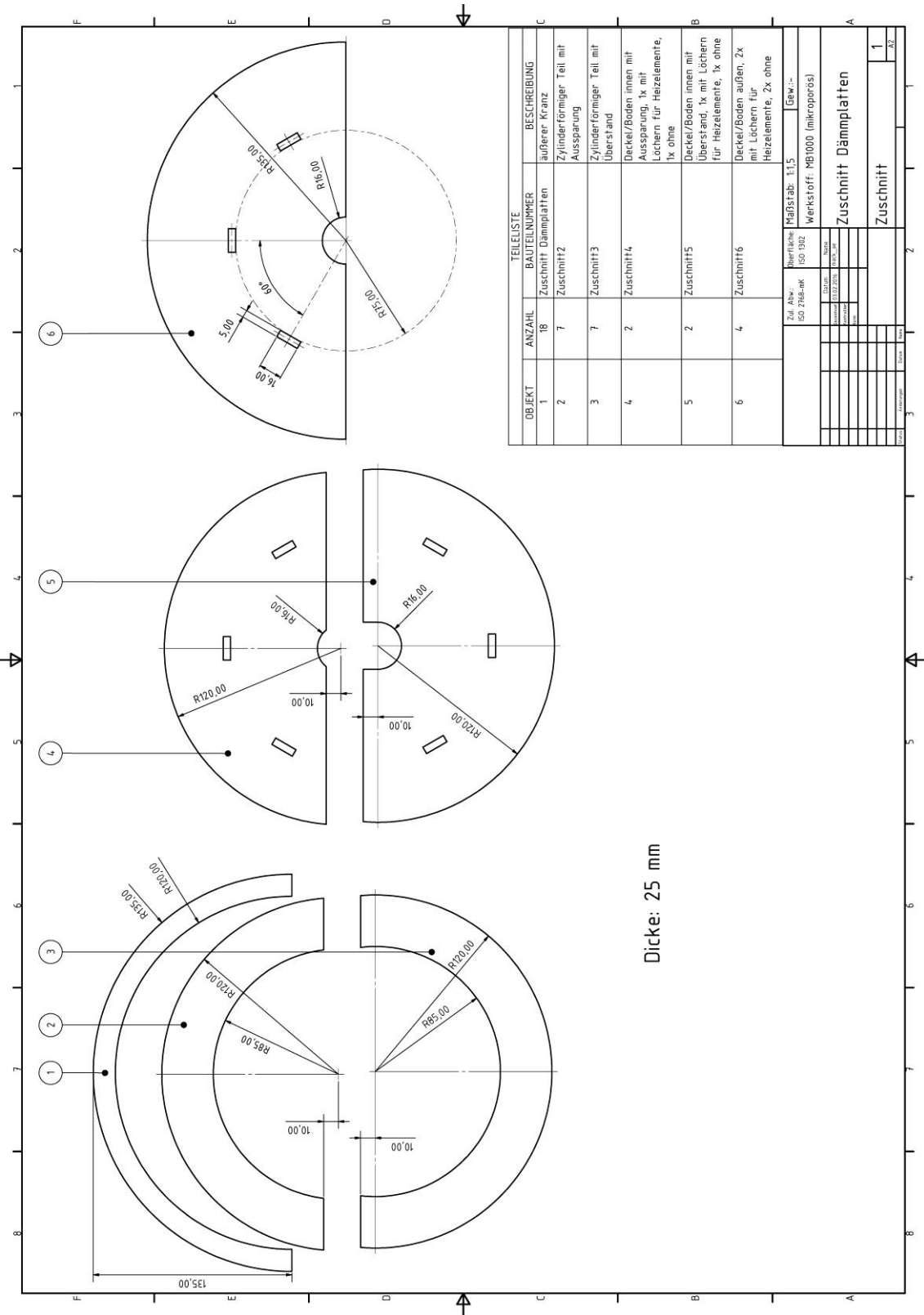


Abbildung 84 Zuschnitt der mikroporösen Dämmplatten

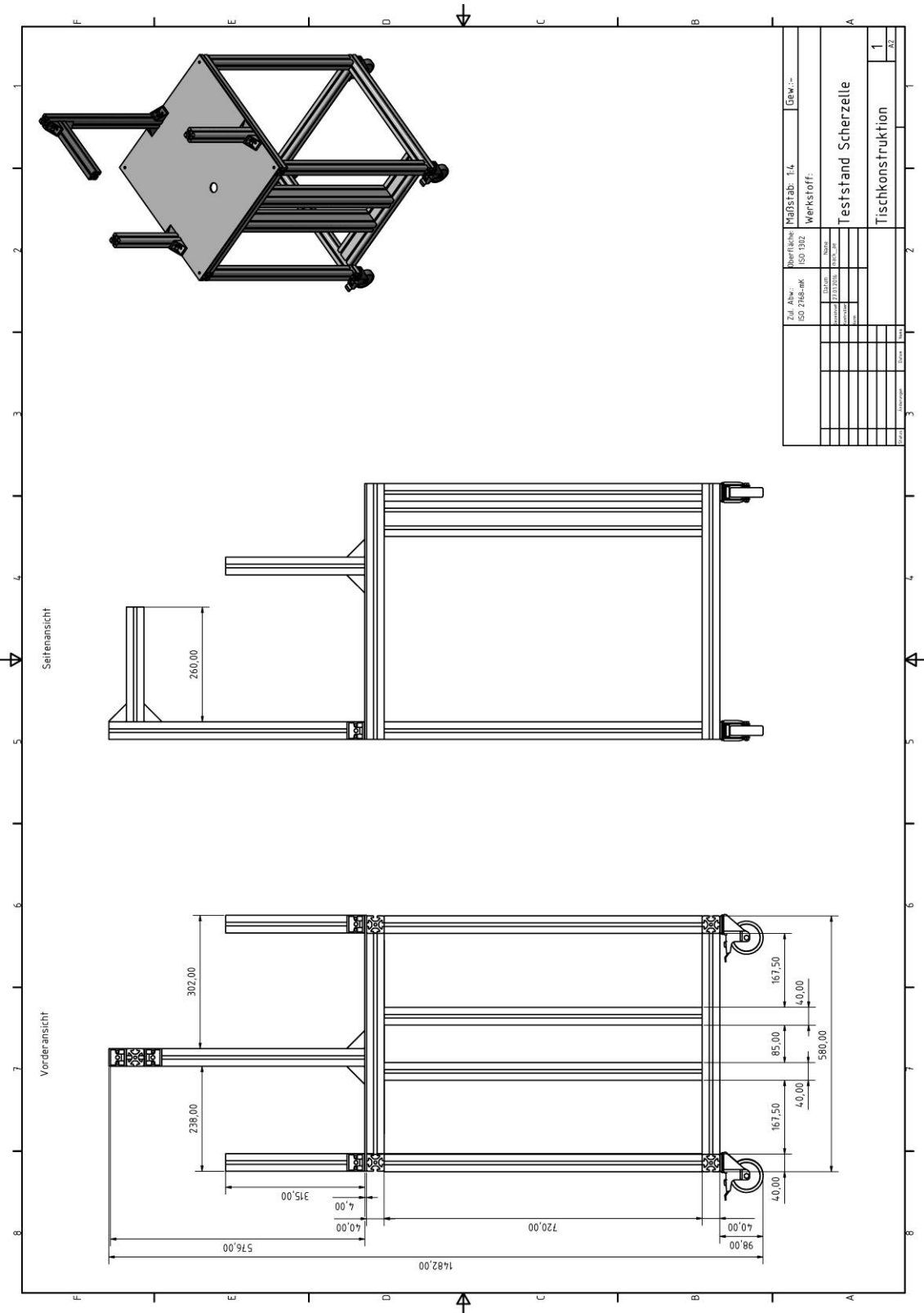


Abbildung 85 Tischkonstruktion

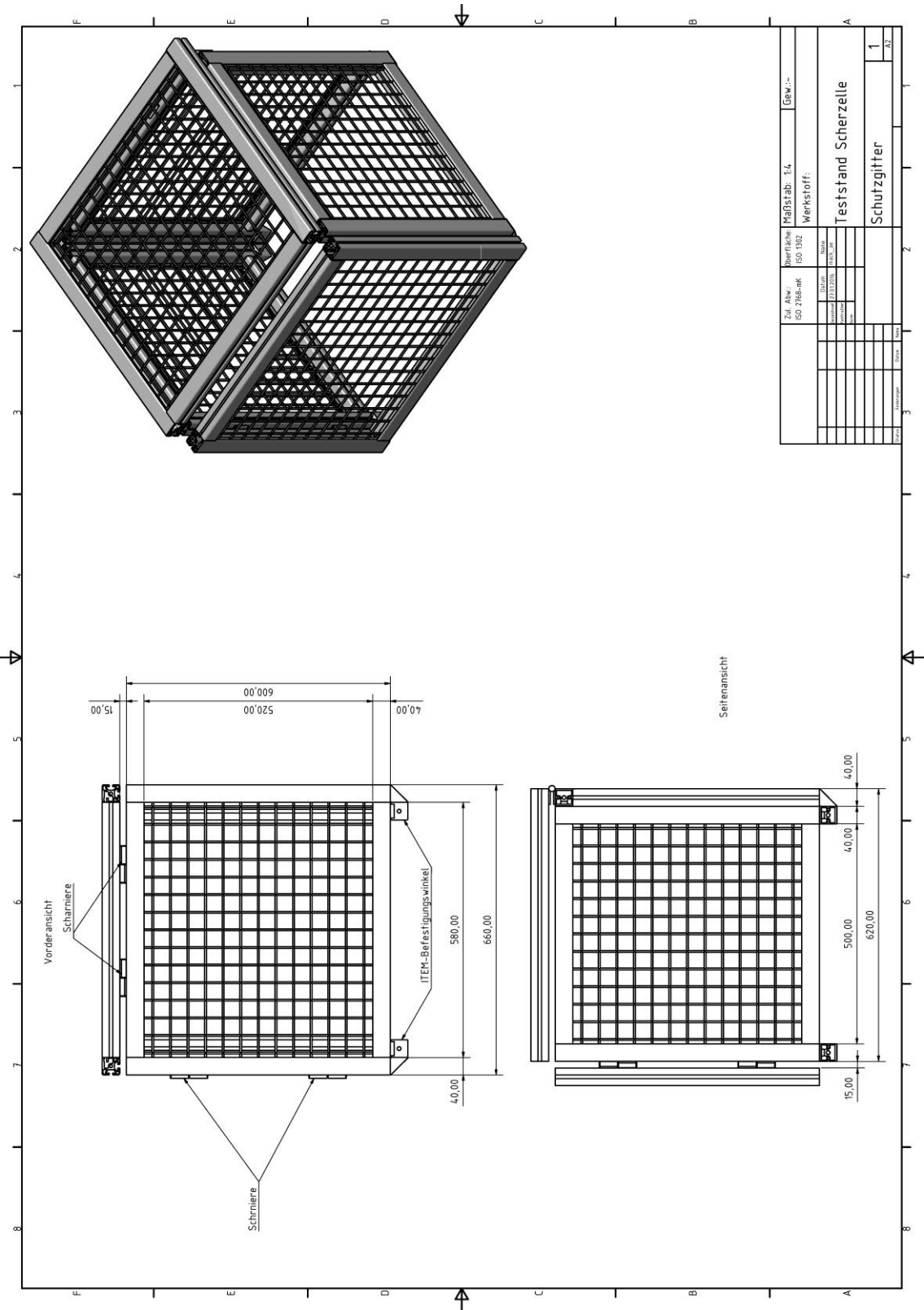


Abbildung 86 Konstruktionszeichnung des Schutzgitters

10.2 FEM-Dokumentation

10.2.1 Einführung

10.2.1.1 Beschreibung der Problemstellung

Eine Ringscherzelle zur Erzeugung von Partikelverschleiß durch Abrieb soll für die Messung unter Temperatureinfluss konstruiert werden. Das Ziel ist die Erhitzung der Partikelproben (Bauxit-Partikel) durch Strahlungsheizer auf eine minimale Probentemperatur von 850 °C in höchstens 1 h. Dafür ist die optimale Heizungskonfiguration unbekannt.

10.2.1.2 Beschreibung der Aufgabenstellung

Modellierung verschiedener Heizungskonfigurationen zur Bestimmung der optimalen Lösungsvariante. Dabei werden die Aufheizzeit und die Kosten der Heizung berücksichtigt.

10.2.1.3 Vorgehensweise

- Modellierung der Strahlung innerhalb der Scherzelle
- Analyse der Wärmeverluste durch Konvektion.
- Erfassung des Temperaturprofils
- Erfassung der Strahlungsleistung

10.2.1.4 Einschränkungen

- Nichtbetrachtung von thermischer Strahlung an den Oberflächen der Bauteile die außerhalb der Dämmung liegen und an der Außenfläche der Dämmung
- Keine Leistungsbegrenzung der Heizelemente
- Temperatur der Heizelemente von Anfang an auf Heiztemperatur, keine Rampe
- Die Partikelprobe wird als ringförmiger Festkörper simuliert
- Scherzelle im Stillstand, keine Rotation
- Keine temperaturabhängigen Materialdaten der Heizelemente vorhanden, deshalb mit konstanten Werten gerechnet

10.2.1.5 Schnittstellen

Die Heizelemente sind aus einer beheizten und einer unbeheizten Zone aufgebaut, Abbildung 87 zeigt beispielhaft einen Strahlungsheizter. Die Länge der beheizten Zone ist variabel.

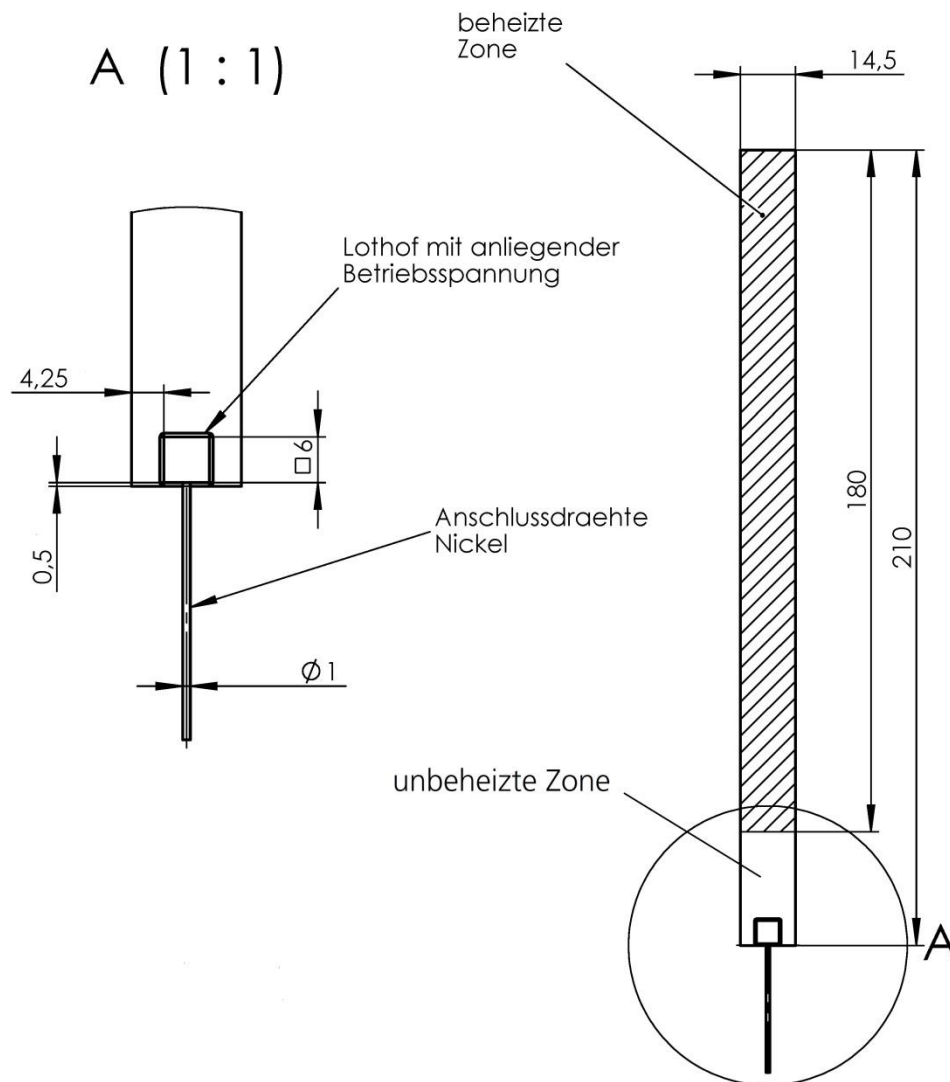


Abbildung 87 beispielhafte Zeichnung eines Heizelementes, nach [26]

10.2.2 Berechnungsmodell

10.2.2.1 Geometrie

Für die Analysen wurde ein vereinfachtes Modell der Scherzelle verwendet. Das bedeutet, dass sämtliche Bohrungen, Nuten und Fasen in den Bauteilen der Scherzelle unterdrückt wurden. Weiterhin besteht die Dämmung aus einem Teil und die Heizelemente sind ohne die Anschlusskontakte eingefügt worden. Die Dämmstärke liegt an jeder Stelle bei 50 mm. Zur besseren Übersichtlichkeit ist das Modell in Abbildung 88 aufgeschnitten. Dargestellt ist beispielhaft die Konfiguration mit vier Heizelementen mit 30 mm Breite. Für den Vergleich der Heizungskonfigurationen wurden lediglich Anzahl und Form der Heizelemente geändert.

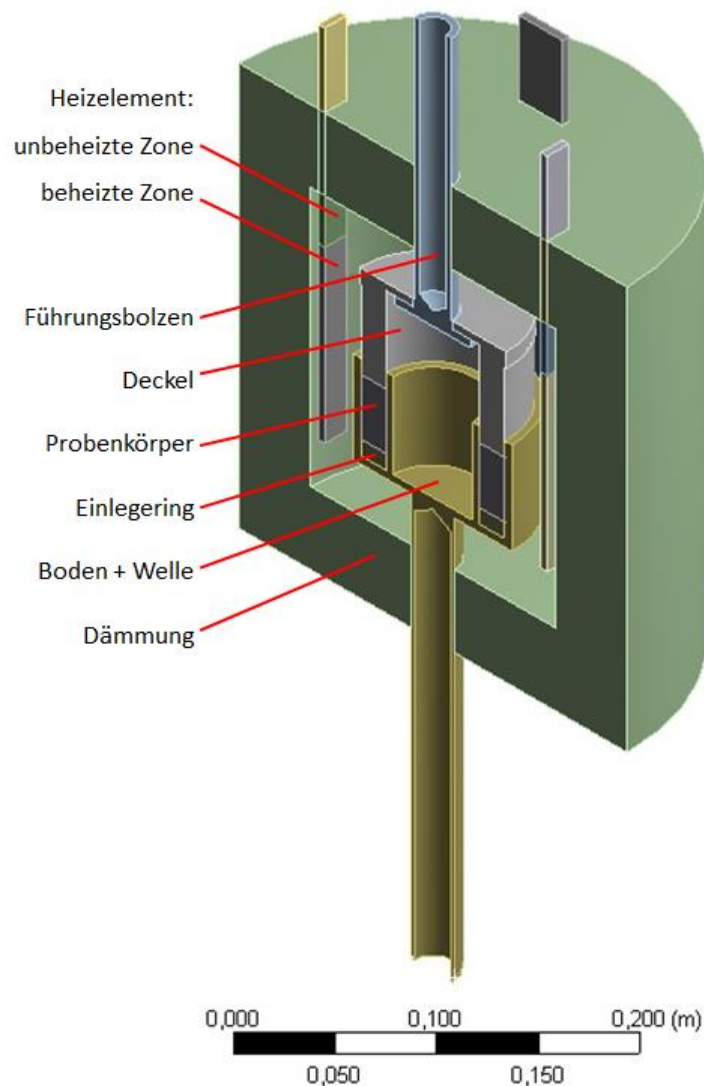


Abbildung 88 Vereinfachtes Modell der Scherzelle

10.2.2.2 Randbedingungen

- Initial-Temperatur: 22 °C
- Temperatur:
Festlegung der Temperatur der beheizten Zonen der Heizelemente auf 900 °C (bzw. 950 °C). Das gilt für den kompletten Körper, nicht nur für die Oberflächen der beheizten Zone (Auswahl „entire body“)
- Strahlung 1
Alle Oberflächen der beheizten Zonen und der unbeheizten Zonen der Heizelemente innerhalb der Dämmung
Emissivität: 0,9 (lt. Hersteller Strahlungsheizer)
Umgebungstemperatur: 22 °C (voreingestellter Wert, irrelevant für betrachtetes Problem, getestet)

- Strahlung 2:
Alle metallischen Flächen der Scherzelle, innerhalb der Dämmung
Emissivität: 0,8 (Annahme, gilt ungefähr für oxidierten Stahl [27])
Umgebungstemperatur: 22 °C
- Strahlung 3:
innere Oberfläche der Dämmung (Kalottenfolie)
Emissivität: 0,8 (Annahme)
Umgebungstemperatur: 22 °C
- Konvektion
Alle Außenflächen (Dämmung, Flächen der Heizelemente außerhalb der Dämmung und metallische Wellenfortsätze). Der Wärmeübergangskoeffizient α gilt ungefähr für freie Konvektion an Luft.

$$\alpha = 7 \frac{W}{m^2 K}$$

10.2.2.3 Untersuchte Konfigurationen

Die Anordnung der Heizelemente erfolgt stets kreisförmig mit gleicher Winkelteilung und gleichem Abstand zur Scherzelle. In Tabelle 10 sind die untersuchten Heizungskonfigurationen zusammengefasst.

Tabelle 10 Untersuchte Heizungskonfigurationen

Heizelement-Typ	Anzahl	Heiztemperatur	Bezeichnung der Variante
„schmal“ (210x14,5 mm, 80 mm beheizte Zone)	4	900 °C	S4-900
„schmal“ (210x14,5 mm, 80 mm beheizte Zone)	4	950 °C	S4-950
„schmal“ (210x14,5 mm, 80 mm beheizte Zone)	6	900 °C	S6-900
„schmal“ (210x14,5 mm, 80 mm beheizte Zone)	6	950 °C	S6-950
„breit“ (228x30 mm, 120 mm beheizte Zone)	4	900 °C	B4-900
„breit“ (228x30 mm, 120 mm beheizte Zone)	4	950 °C	B4-950
„breit“ (228x30 mm, 120 mm beheizte Zone)	6	900 °C	B6-900

10.2.2.4 Materialdaten

Die verschiedenen Teile der Scherzelle bestehen aus den in Tabelle 10 gelisteten Materialien. Dabei ist zu beachten, dass der Werkstoff 1.4571 (V4A) nur bis ca. 700 °C verwendbar ist. Er wird dennoch für die erste Version der Scherzelle verwendet, da es sich um einen gängigen Edelstahl handelt. Gegebenenfalls wird es noch eine weitere Version der Scherzelle aus hochwarmfestem Stahl geben, deshalb wird die Heizung für den Betrieb der Scherzelle bis zu 850 °C ausgelegt.

Tabelle 10 Materialien der Bauteile der Geometrie

Bauteil	Material
Dämmung	SILCAPOR HIGH 1050
Deckel	1.4571 (V4A)
Führungsbolzen	1.4571 (V4A)
Probe	Schüttung aus Bauxit-Partikeln

Boden+Welle	1.4571 (V4A)
Heizelemente	Heißgepresstes Siliziumnitrid

10.2.2.4.1 Bauxit

Die Probe besteht aus Bauxitpartikeln, die normalerweise in der Erdöl-Industrie eingesetzt werden, um beim sogenannten „Fracking“ erzeugte Risse im Boden offen zu halten. Die Partikel eignen sich durch ihre Temperaturbeständigkeit und Färbung jedoch auch gut für den Einsatz bei CSP-Anwendungen.

Tabelle 11 Materialdaten Bauxit

Bauxit-Partikel		
(Schütt-) Dichte ρ_s	2100	kg/m ³
spezifische Wärmekapazität c_p	1000	J/kg·K
Wärmeleitfähigkeit λ	T [°C]	λ [W/m·K]
	20	0,29
	200	0,36
	400	0,49
	600	0,6
	800	0,8

Die Materialdaten der Dichte können dem Datenblatt [28] der Firma CARBO entnommen werden. Für die spezifische Wärmekapazität wird ein mittlerer Wert von $1000 \frac{J}{kg \cdot K}$ angenommen. Die temperaturabhängigen Werte der Wärmeleitfähigkeit der Partikelschüttung entstammen nicht veröffentlichten, DLR- internen Messungen.

10.2.2.4.2 SILCAPOR HIGH 1050

Die verwendeten Materialdaten entstammen dem Datenblatt [29] für den mikroporösen Dämmstoff SILCAPOR High 1050 von Silca. Mikroporöse Dämmstoffe zählen zu den besten Dämmstoffen bei hohen Temperaturen. Die Stoffdaten können Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12 Stoffdaten Dämmstoff SILCAPOR High 1050

SILCAPOR High 1050		
Dichte $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	250-310	
Spezifische Wärmekapazität $c_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	1050	
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ bei ϑ [°C]	0,022	50
	0,024	200
	0,032	400
	0,044	600
	0,062	800
	0,086	1000

10.2.2.4.3 1.4571 (V4A)

Die Stoffdaten wurden dem VDI Wärmeatlas entnommen und sind in Tabelle 13 aufgelistet. Es handelt sich dabei um einen titanstabilisierten, austenitischen Edelstahl mit hohen Anteilen an Chrom und Nickel.

Tabelle 13 Stoffwerte 1.4571 (V4A)

	1.4571 V4A	
Dichte ρ	7980	Kg/m ³
Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Spezifische Wärmekapazität c_p $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right]$	Wärmeleitfähigkeit λ $\left[\frac{\text{W}}{\text{m K}}\right]$
20	470	13
200	530	17
400	560	20
600	600	22
800	610	25

10.2.2.4.4 Heißgepresstes Siliziumnitrid

Die Heizelemente werden aus heißgepresstem, oder gesintertem, Siliziumnitrid hergestellt. Diese Keramik zeichnet sich durch ihre sehr gute Beständigkeit gegen Temperaturschocks aus und kann bei Temperaturen $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendet werden. Die Materialdaten in Tabelle 14 stammen von der Website des Herstellers [30]. Eine Bezugstemperatur ist nicht angegeben, eine weitere Recherche ergab jedoch, dass es sich um Werte bei Raumtemperatur handeln sollte.

Tabelle 14 Materialdaten heißgepresstes Siliziumnitrid

Heißgepresstes Siliziumnitrid Si_3N_4	
Dichte $\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	3210
Spezifische Wärmekapazität $c_p \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right]$	750
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m K}}\right]$	40

10.2.2.5 FE- Netz

Eine Netzstudie wurde beispielhaft für eine Heizungskonfiguration durchgeführt. Dabei wurden sowohl transiente, als auch stationäre Analysen durchgeführt und die Elementgröße schrittweise verringert. Anschließend folgte der Vergleich der Ergebnisse. Bei den transienten thermischen Analysen wurden minimale und maximale Probentemperatur nach 3600 s Analysezeitraum erfasst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15 Netzstudie transiente thermische Analyse

Variante	Elementgröße [m]	Knotenanzahl [-]	Min. Probentemperatur [°C] (nach 3600s)	Max. Probentemperatur [°C] (nach 3600s)
S6-950	0,02	30582	875,63	895,28
S6-950	0,015	60523	874,86	894,63
S6-950	0,01	176561	862,39	883,43
S6-950	0,007	478798	861,73	882,9

Werden die Temperaturen über der Knotenanzahl aufgetragen, so erhält man den in Abbildung 89 dargestellten Verlauf.

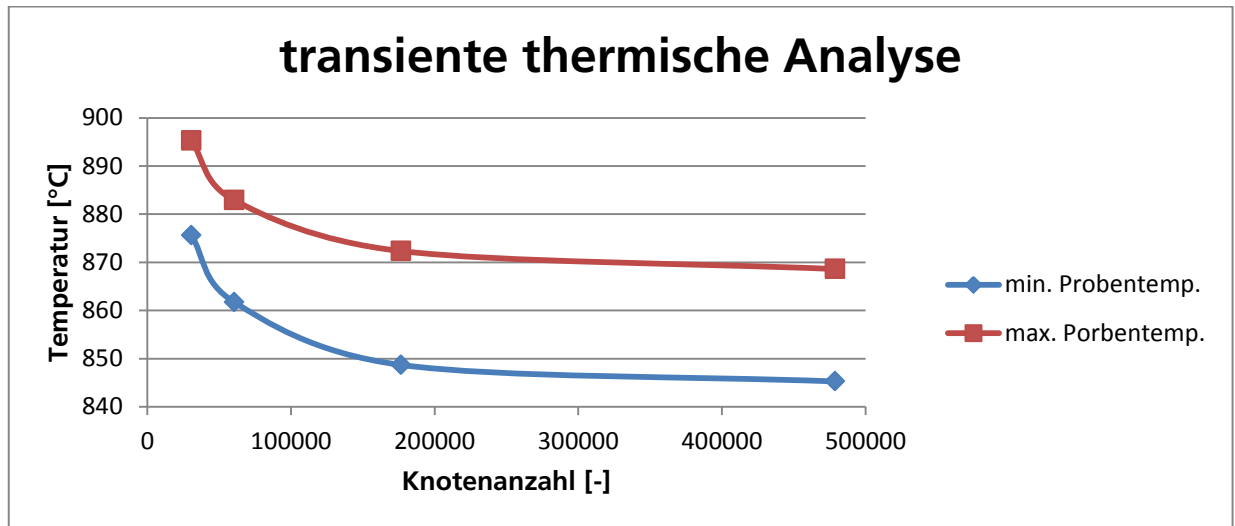


Abbildung 89 Probentemperaturen über der Knotenanzahl (transient)

Als nächstes wurden Analysen für den thermisch stationären Zustand durchgeführt. Zusätzlich zu den Probentemperaturen erfolgte die Erfassung von Heiz- und Verlustleistung (s. Tabelle 16).

Tabelle 16 Netzstudie stationäre thermische Analyse

Variante	Elementgröße [m]	Knotenanzahl [-]	Min. Proben-temp. [°C]	Max. Proben-temp. [°C]	Verlustleistung [W]	Heizleistung [W]
S6-950	0,02	30582	895,68	907,31	225,98	300,12
S6-950	0,015	60523	899,3	909,91	227,15	281,67
S6-950	0,01	176561	901,03	911,1	227,78	270,6
S6-950	0,007	478798	903,29	912,34	228,73	261,5
S6-950	0,006	735172	904,16	912,89	228,97	257,44

Abbildung 90 zeigt den Verlauf der Probentemperaturen mit zunehmender Knotenanzahl, in Abbildung 91 ist die Änderung von Heiz- und Verlustleistung zu sehen.

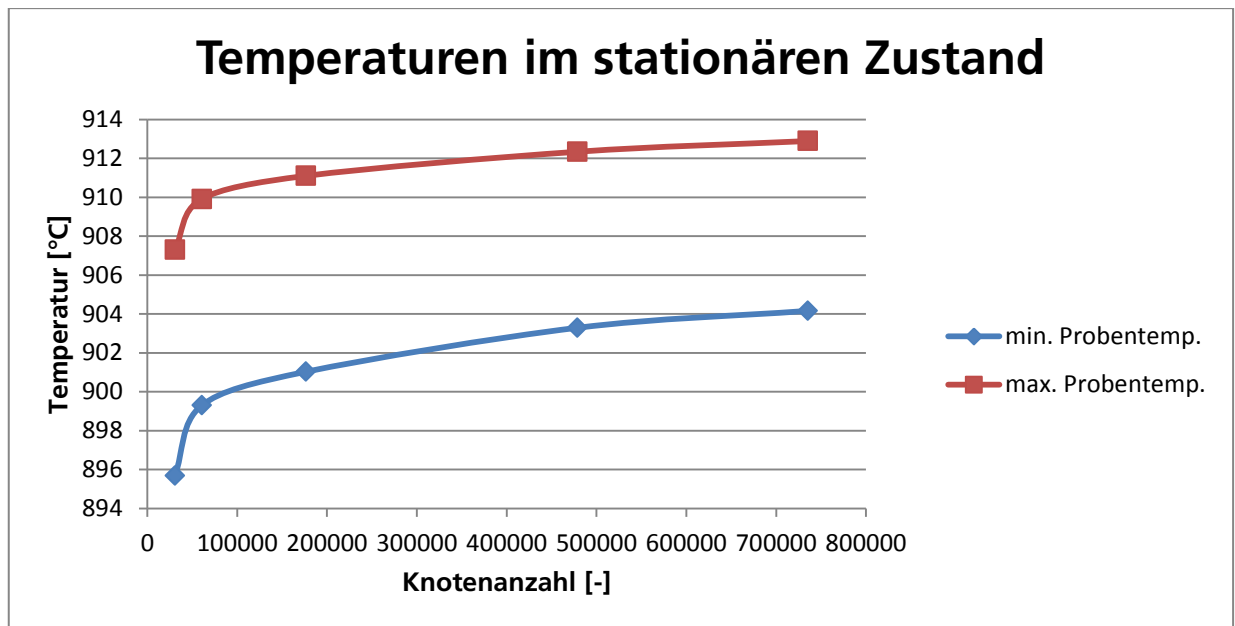


Abbildung 90 Probentemperaturen über der Knotenanzahl (stationär)

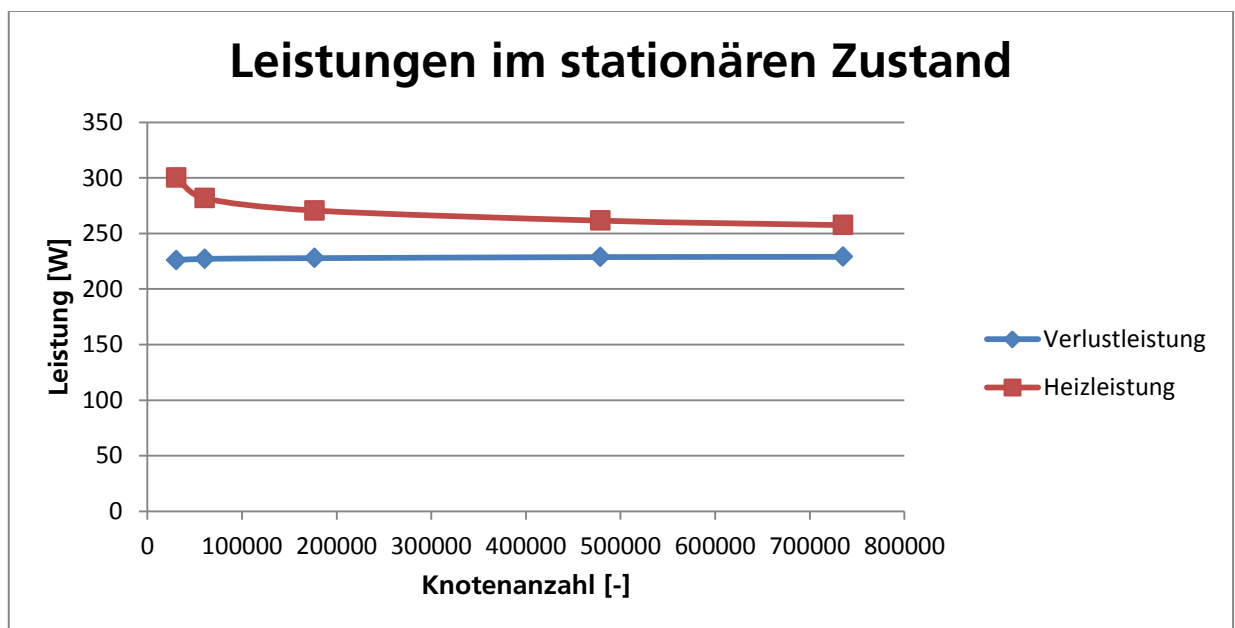


Abbildung 91 Leistungen über der Knotenanzahl (stationär)

Bei Betrachtung der aufgezeichneten Verläufe fällt auf, dass die Steigung der Kurven mit zunehmender Knotenanzahl stets abnimmt. Sie konvergieren demnach gegen einen bestimmten Wert, was sich mit den Erwartungen deckt. Somit können große numerische Fehler des Modells ausgeschlossen werden. Als Kompromiss zwischen Rechenzeit und Ergebnisgenauigkeit wurde für die folgenden Analysen eine Knotenanzahl von ca. 250000 gewählt.

10.2.2.6 Koordinatensysteme

Ein Koordinatensystem, der Ursprung liegt im Schnittpunkt der Rotationsachse der Teile (Y-Achse) mit der Ebene, in der die Unterseite des Bodens liegt.

10.2.2.7 Auswertungsgrößen

- Temperatur 1:
Alle Körper
- Temperatur 2:
Probenraum, Minimal- und Maximalwert
- Durch die Heizelemente übertragene Strahlungsleistung („Reaction Probe“ für die Temperatur-Randbedingung der Heizflächen)
- Wärmeverluste durch Konvektion („Reaction Probe“ für die Konvektions-Randbedingung)

10.2.3 Auswertung

In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Analysen der verschiedenen Heizungskonfigurationen zusammengefasst. Die minimale Probentemperatur wurde jeweils nach 1 h erfasst. Abbildung 92 zeigt die grafische Aufarbeitung der Analyseergebnisse.

Tabelle 17 Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs

Fall	Konfiguration	Heiztemperatur [°C]	Min. Probentemp. [°C] (nach 3600 s)
1	4 schmale Heizelemente	900	*
2	4 schmale Heizelemente	950	766,28
3	6 schmale Heizelemente	900	787,27
4	6 schmale Heizelemente	950	849,21
5	4 breite Heizelemente	900	846,65
6	4 breite Heizelemente	950	902,37
7	6 breite Heizelemente	900	870

* Zieltemperatur selbst im stationären Zustand nicht erreicht

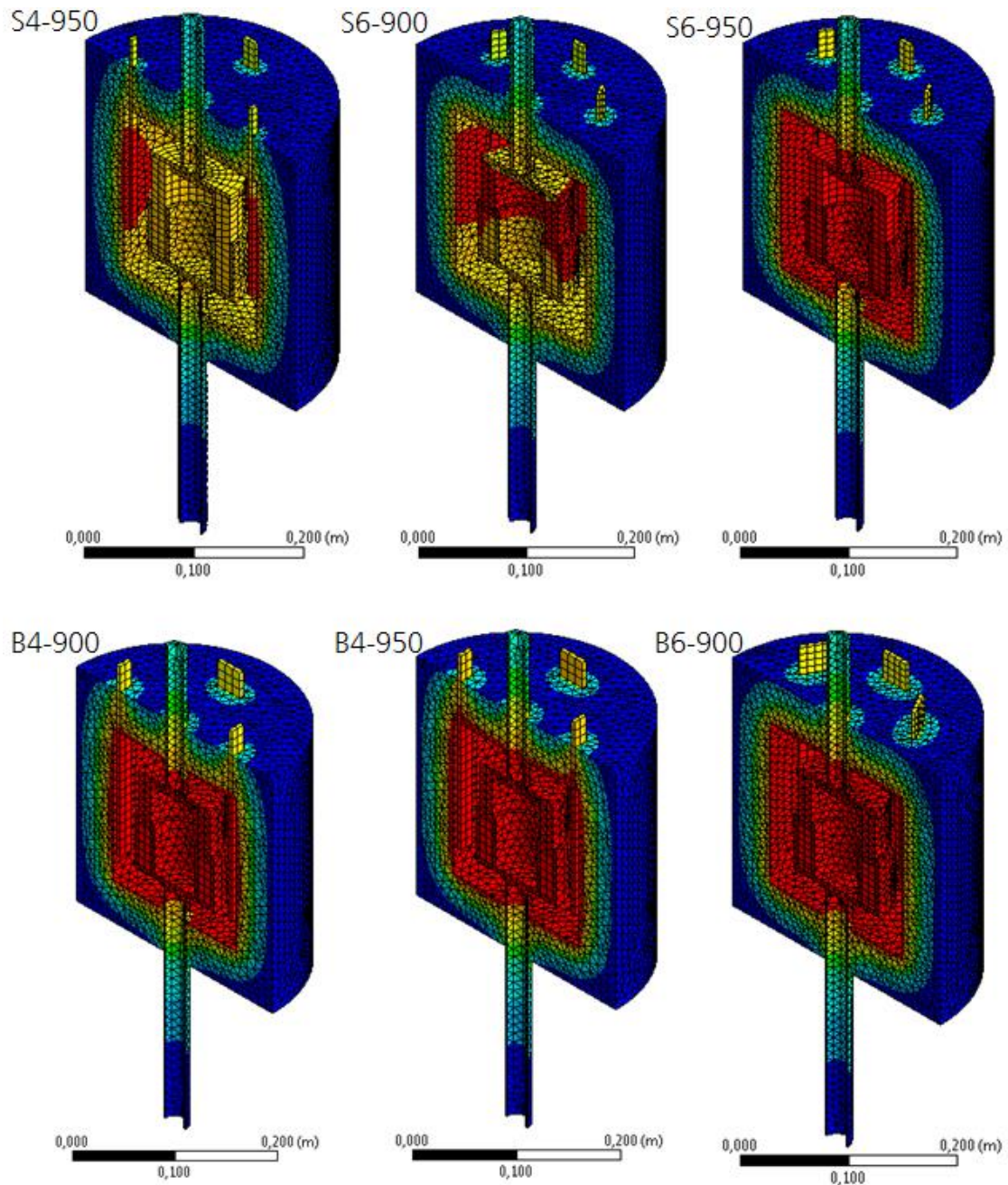


Abbildung 92 Temperaturverteilung in der Versuchsvorrichtung

10.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Varianten S6-950, B4-900, B4-950 und B6-900 erfüllen die Forderung, wonach die minimale Proben­temperatur nach 1 h bei 850 °C liegen soll. Die geringen Abweichungen der beiden Erstgenannten werden als akzeptabel eingestuft. Bei den breiten Heizelementen handelt es sich um Sonderanfertigungen, für die erst ein entsprechendes Werkzeug hergestellt werden muss. Das ist mit höheren Kosten und einer längeren Lieferzeit verbunden. Aufgrund dessen fällt die Wahl auf die Variante S6-950.

10.3 Datenblätter

1.4923

X22CrMoV12-1
Nichtrostender hochwarmfester Chrom-Stahl mit Molybdänzusatz
C 0,18 – 0,24 **Cr** 11,00 – 12,50 **Ni** 0,30 – 0,80 **Mo** 0,80 – 1,20 **V** 0,25 – 0,35

Kurzbeschreibung

1.4923 ist ein Standardstahl für Bauteile wie Dampfturbinen und hochwarmfeste Schrauben etc.. Der Vanadiumzusatz bewirkt eine Erhöhung der Zeitdehn- und Zeitstandfestigkeit dieser Güte.

Aktuelle und veraltete Normen

EN 10269	1.4923	X22CrMoV12-1
DIN 17240	1.4923	
VD TÜV Blatt 110	1.4922	X20CrMoV12-1

Allgemeine Eigenschaften

Korrosionsbeständigkeit	Mittel
Mechanische Eigenschaften	Gut
Schmiedbarkeit	Gut
Schweißneigung	Gut
Spanbarkeit	Mittel

Besondere Eigenschaften

Zuverlässig bis 600 °C
Maximal erreichbare Härte 590 HV

Physikalische Eigenschaften

Dichte (kg/dm³)	7,70
Elektr. Widerstand bei 20 °C (Ω mm²/m)	0,60
Magnetisierbarkeit	Vorhanden
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K)	24
bei 650 °C (W/m K)	29
Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K)	460
bei 800 °C (J/kg K)	540
Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient (K⁻¹)	20 – 100 °C: 10,5 × 10⁻⁶
	20 – 200 °C: 11,0 × 10⁻⁶
	20 – 300 °C: 11,5 × 10⁻⁶
	20 – 400 °C: 12,0 × 10⁻⁶
	20 – 500 °C: 12,3 × 10⁻⁶
	20 – 600 °C: 12,5 × 10⁻⁶

Hauptanwendung

Druck- und Dampfkessel
Luft- und Raumfahrt
Reaktortechnik
Turbinenbau

Hinweis: Alternativwerkstoff WL 1.4934
Nur im wärmebehandelten Zustand +QT1 nach Druckgeräte-Richtlinie 97/23 EG einsetzbar.

Verarbeitung

Automatenbearbeitung	Nicht üblich
Spangebende Verarbeitung	Ja
Freiform- und Gesenkschmieden	Ja
Kaltumformung	Bedingt
Kaltstauchen	Bedingt

Liefermöglichkeiten

Im Wesentlichen vergütet

Nachfragetendenz

Steigend

Korrosionsbeständigkeit (PRE = 16,0 – 18,0)

Aufgrund seines relativ niedrigen Chromgehaltes ist die Korrosionsbeständigkeit des 1.4923 begrenzt, in natürlichen Umweltmedien (Wasser, ländliche und städtische Atmosphäre) bei Abwesenheit von Chlor- und Salzkonzentrationen ist die Korrosionsbeständigkeit jedoch zufriedenstellend. 1.4923 ist beständig gegen Wasserdampf.

Wärmebehandlung/mechanische Eigenschaften

Die optimalen mechanischen Eigenschaften werden durch Vergüten erreicht, wobei der Stahl durch ein Halten im Bereich zwischen 1020 °C und 1070 °C gehärtet wird mit anschließendem Abschrecken in Luft, Öl oder Polymer. Die Anlassstemperatur ist abhängig von der angestrebten Festigkeit. In den meisten Fällen führt eine Anlassbehandlung im Temperaturbereich von 640 °C – 740 °C mit anschließender Abkühlung an Luft zu den gewünschten Eigenschaften. Für diesen Zustand gelten die folgenden Werte für die mechanischen Eigenschaften:

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE

Providing special steel solutions



1.4923

X22CrMoV12-1
C 0,18 – 0,24 Cr 11,00 – 12,50 Ni 0,30 – 0,80 Mo 0,80 – 1,20 V 0,25 – 0,35

Streckgrenze (N/mm ²)	R _{p0,2}	QT 1	Typische Werte
Zugfestigkeit (N/mm ²)	R _m	≥ 600	675
Bruchdehnung (%)	A ₅	800 – 950	880
Kerbschlagarbeit (J) 25 °C ISO-V		≥ 14	17
		≥ 52	

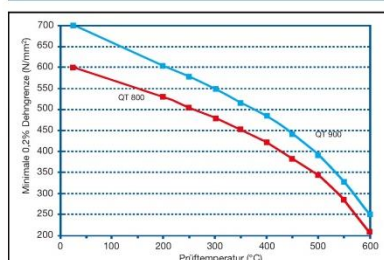
Streckgrenze (N/mm ²)	R _{p0,2}	QT 2*	Typische Werte
Zugfestigkeit (N/mm ²)	R _m	≥ 700	800
Bruchdehnung (%)	A ₅	900 – 1050	960
		≥ 11	15

* Zustand QT2 lieferbar, jedoch nicht nach 97/23 EG einsetzbar.

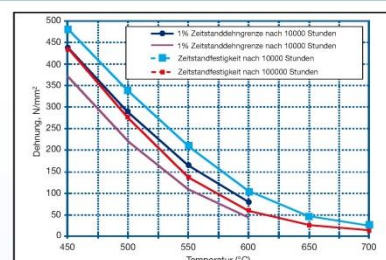
Für dickere Abmessungen (d ≥ 160 mm) müssen die mechanischen Eigenschaften vereinbart werden, oder die Lieferung geschieht in Anlehnung an die angegebenen Werte.

Hinweis: Um Härterisse zu vermeiden, muss das Anlassen so schnell wie möglich nach dem Härtevorgang durchgeführt werden. Spannungsarmglühen wird üblicherweise im Temperaturbereich zwischen 600 °C und 680 °C durchgeführt.

Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen



Die Mindestfestigkeiten bei verschiedenen Temperaturen sind üblicherweise bei dieser Stahlgüte zu erwarten.



Die für 1.4923 wichtigen Warmfestigkeitseigenschaften zeigt das obenstehende Diagramm.

Schweißen

Beim 1.4923 können Schweißarbeiten nur unter besonderen Vorsichtsmaßnahmen durchgeführt werden. Die Vorwärmtemperatur soll 400 °C – 450 °C betragen und ist von der Werkstückgeometrie abhängig. Weiterhin sollte eine Zwischenlagentemperatur von 400 °C – 500 °C eingehalten werden. Nach dem Schweißen kann sofort weichgeglüht oder vergütet werden. Soll eine Anlassbehandlung folgen, muss die Schweißverbindung langsam auf 100 °C – 150 °C abgekühlt werden. Nach vollständiger Martensitumwandlung erfolgt eine mindestens 4-stündige Anlassglühung bei 740 °C – 780 °C. Nach dem Anlassen ist langsam abzukühlen.

Schmieden

Das Werkstück muss zunächst langsam auf ca. 850 °C erwärmt werden, dann schneller auf 1150 °C – 1180 °C. Das Schmieden findet zwischen 1180 °C und 950 °C statt, mit anschließender langsamer Abkühlung im Ofen, in trockenen Aschen oder ähnlichen Materialien, die eine langsame Abkühlung gewährleisten. Nach dem Schmieden folgt eine Wärmebehandlung mit den oben genannten Parametern.

Spanende Bearbeitung

Die Bearbeitbarkeit hängt direkt von Härte und Festigkeit ab. Sie ist beim 1.4923 ähnlich der bekannter Baustähle. In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Gefügeausbildungen möchten wir Ihnen für diesen Stahl die folgenden Schnittbedingungen mit beschichteten Hartmetallschneidwerkzeugen vorschlagen:

	Spantiefe (mm)	6	3	1
	Vorschub (mm/U)	0,5	0,4	0,2
Geglüht, R_m 700 – 800 N/mm²	Schnittgeschwindigkeit (m/min)	100	130	165

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH
Auestraße 4
58452 Witten
www.dew-stahl.com

Tel.: +49 2302 29 0
Fax: +49 2302 29 4000
stainless@dew-stahl.com

Revisions-Nr. 4923-1 Erstellt: 01.08.07 Druckfehler, Irrtümer und Änderungen vorbehalten.

Abbildung 93 Datenblatt Werkstoff 1.4923



Wärmeübertragung mit System.

Apparatebau • Wärmeaustauscher • Tank- und Behälterbau • Kolonnen
WTP-Temperiersystem • Rührwerksbehälter • Sonderkonstruktionen

Werkstoff Nr. 1.4404

WERKSTOFFEINTEILUNG NACH ISE/TR UND IST/TR 15608:2005	8.1				
ZUGEHÖRIGES WERKSTOFFBLATT	DIN EN 10028-7				
VERGLEICHBARE ASME- UND UNS-TYPE	316L / S31603				
BEZEICHNUNG NACH DIN/EN	X 2 CrNiMo 17-12-2				
SONSTIGE BEZEICHNUNGEN	V4A Supra NK				
WERKSTOFFGRUPPE	Rost- und säurebeständiger Stahl				
CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG (RICHTWERTE IN %)	C	Si	Ni	Mn max.	P max.
	≤0,03	≤1,00	10-13	2	0,045
	Cr	Mo			S max.
	16,5-18,5	2,0-2,5			0,015
HERSTELLERBEZEICHNUNGEN	Outokumpo (°Sandvik / Polarit)				4404
	CIJ-FAFER				ICL 164 BC
	Krupp Thyssen (Remanit)				4404
	Krupp Thyssen VDM (+Nicrofer / °Cronifer)				° 1810 LC
	R. Zapp (HAYNES) Zapp				-
ÜBLICHER LIEFERZUSTAND	lösungsgeglüht, abgeschreckt				
GEFÜGE	Austenit				
FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN BEI RAUMTEMPERATUR BEI BLECHDICKE MAX. 40MM	Streckgrenze oder 0,2-Grenze mind. Rp 0,2				220 Mpa
	Zugfestigkeit Rm				520 bis 670 Mpa
	Bruchdehnung ≤ 3 ≤ 75 mm Dicke A 5 längs/quer in %				45
	Kerbschlag Mittelwert ISO-V-Probe < 75 mm, quer				60 J
	1-% Dehngrenze mind. Rp 1,0				260 Mpa
	E-Modul				200.000 Mpa
PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN	Wärmeausdehnung (m • 10-6 m • K 100) zwischen 20 und 100 °C: 16,5				
	Wärmeausdehnung (m • 10-6 m • K 100) zwischen 20 und 200 °C: 17,5				
	Wärmeausdehnung (m • 10-6 m • K 100) zwischen 20 und 300 °C: 18,5				
	Wärmeausdehnung (m • 10-6 m • K 100) zwischen 20 und 400 °C: 18,5				
	Wärmeleitfähigkeit (W m • K) bei 20 °C: 15				
	Dichte (g/cm³): 7,98				
	Härte (HB): ≤ 215				
	Tiefstmögliche Betriebstemperatur (Beanspruchungsfall: III): -270° C				
BESONDERE EIGENSCHAFTEN	Bis zu ~500°C zugelassen				
	sehr hohe Korrosionsbeständigkeit durch Molybdän Zusatz				
	Interkristallin beständig				
	gute Polierbarkeit				
BEVORZUGTE EINSATZGEBIETE	höhere Chlorid				
	Findet vorallem Verwendung in der Textil- und Zellstoffindustrie, durch die				
	hohe Korrosionsbestädngigkeit aber auch in der Chemischen- und				
SCHWEIßEN	der Nahrungsmittelindustrie, der Erdöl- und Bauindustrie verwendung.				
	Wird außerdem zum Transport von Chloridhaltigen medien verwendet				
	gute Schweißbarkeit				

TEMPERATUR BEI BLECHDICKE MAX. 40MM	keine besonderen Maßnahmen oder Wärmenachbehandlungen erforderlich				
	Schweißzusatz-Werkstoffe: 1.4430				
	Streckgrenze oder 0,2-Grenze mind. Rp 0,2	1-% Dehn- grenze Rp 1,0	Zugfestigkeit Rm	E-Modul	α-Wert
	in N/mm ²	in N/mm ²	in N/mm ²	in N/mm ²	in 10 ⁻⁶ /K
	bei erhöhten Tempertaur				
50°C	199	237	486	197.750	-
100°C	166	199	430	194.000	16,500
150°C	152	181	410	190.000	17,000
200°C	137	167	390	186.000	17,500
250°C	127	157	385	182.500	17,500
300°C	118	145	380	179.000	17,500
350°C	113	139	380	175.500	18,000
400°C	108	135	380	172.000	18,500
450°C	103	130	370	168.500	18,500
500°C	100	128	360	165.000	18,500
550°C	98	127	-	-	-
WÄRMEBEHANDLUNG	Warmformgebung in °C: 1150-750				
	Abkühlungsart: Luft				
	Weichglüh-/*Lösungsgl-Temperatur in °C: 1020-1100				
	Abkühlungsart: < 2 mm bewegte Luft, > 2 mm Wasser				

[zurück zur Übersicht](#)

Änderungen und Irrtum vorbehalten.

©2009 LOB GmbH • Porzer Straße 1-5 • 51107 Köln Rath • Tel.: 0221/82953-0 • Fax: 0221/82953-40
www.lob-gmbh.de • info@lob-gmbh.de

Abbildung 94 Datenblatt Werkstoff 1.4404



Technisches Datenblatt

MB1000

Mikroporöse Isolierplatte

MB 1000 Platte ist ein mikroporöser thermischer Dämmstoff mit extrem niedrigen Wärmeleitzahlen, und dadurch mit einem sehr guten Isolationsvermögen. Dieser Wärmedämmstoff besteht ausschließlich aus anorganischen, oxydischen Substanzen. Das Material ist gegenüber Luftfeuchtigkeit (Wasserdampf) diffusionsstabil. **MB 1000** reagiert gegen alle benetzenden Flüssigkeiten wie Wasser, Öl, Benzin usw. empfindlich, da durch diese Flüssigkeiten die Porenstruktur zerstört wird. **MB 1000** ist unbegrenzt lagerfähig

Technische Daten

Klassifikationstemperatur	1000 °C
Farbe	grau/beige
Mögliche Beschichtungen	Glasvlies, PE-Folie, Aluminiumfolie
Rohdichte +/- 10 %	270 kg/m³
Druckfestigkeit gemäß DIN 53421	1,1 N/mm²
Biegefestigkeit	0,16 N/mm²
Schwindung @ 1000°C / 12 Stunden	0,5 %
Brennbarkeitsklassifikation gem. DIN 4102 nicht brennbar/ Bau Material	
Klasse A1	
Chemische Analyse	Mischung aus SiO₂ und armierenden Textilglasfasern

Wärmeleitfähigkeit

Mitteltemperatur/°C	Wärmeleitzahl / W/m*K
200	0,020
400	0,024
600	0,031
800	0,040

Lagerbedingungen

Die Materialien müssen trocken gelagert werden.

Abmessungen

Standard Format:	600x1000mm
Verfügbare Dicken:	10, 15, 20, 25, 30, 40 + 50mm

Die gezeigten Daten sind nur Richtwerte und stellen keine Garantie dar, sie dienen nur zur Orientierung. Die Produkte sollten vor dem Einsatz für Ihre Anwendung geprüft werden.

Becker Insulation GmbH
Lingener Straße 6
DE - 49626 Bippen

Tel.: +49.54 35.3369 495
Fax: +49.54 35.3369 419
E-Mail: info@becker-insulation.de
Internet: www.becker-insulation.de

Abbildung 95 Datenblatt mikroporöse Dämmplatten MB1000

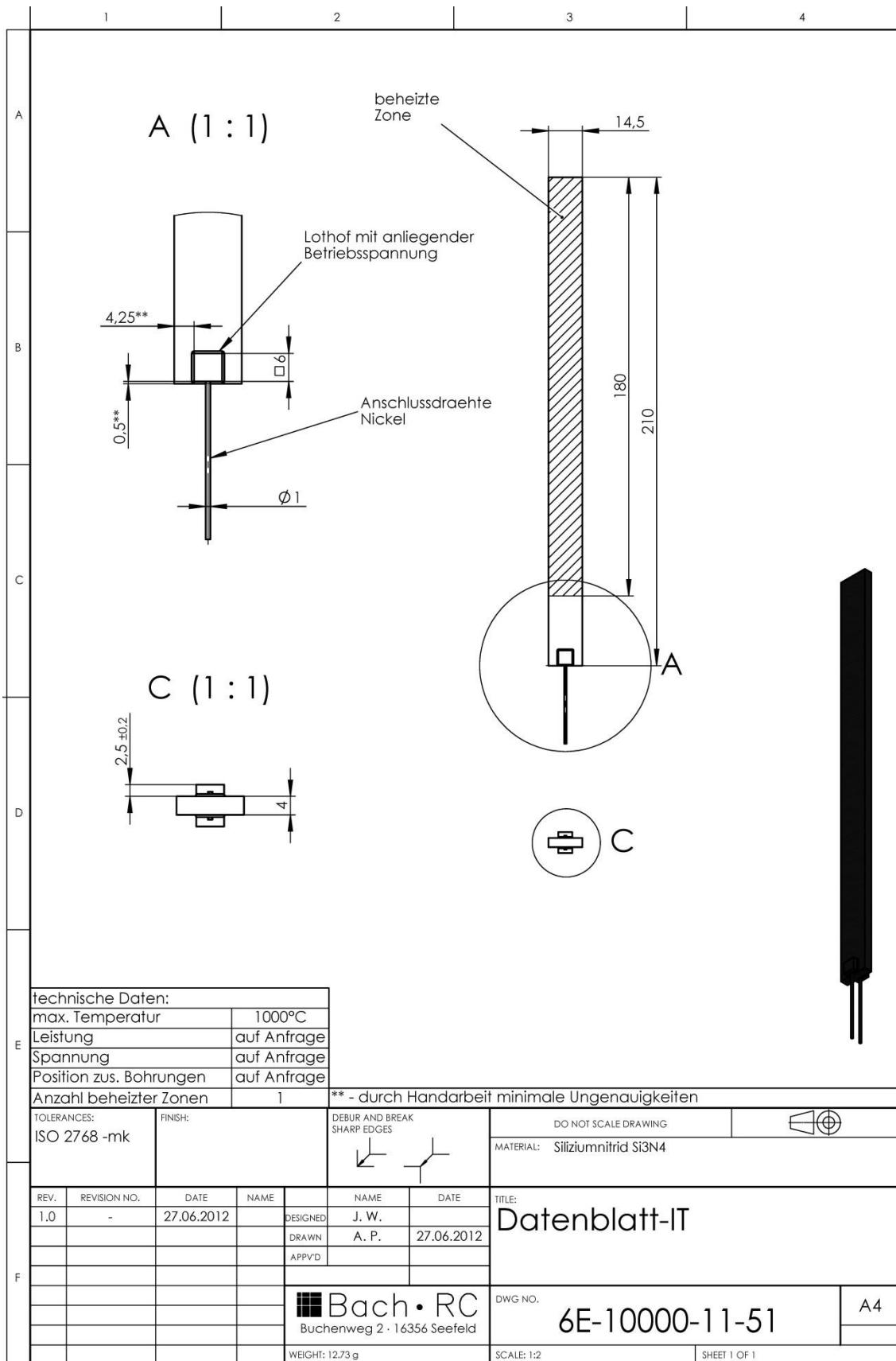


Abbildung 96 Datenblatt Strahlungsheizer STR210

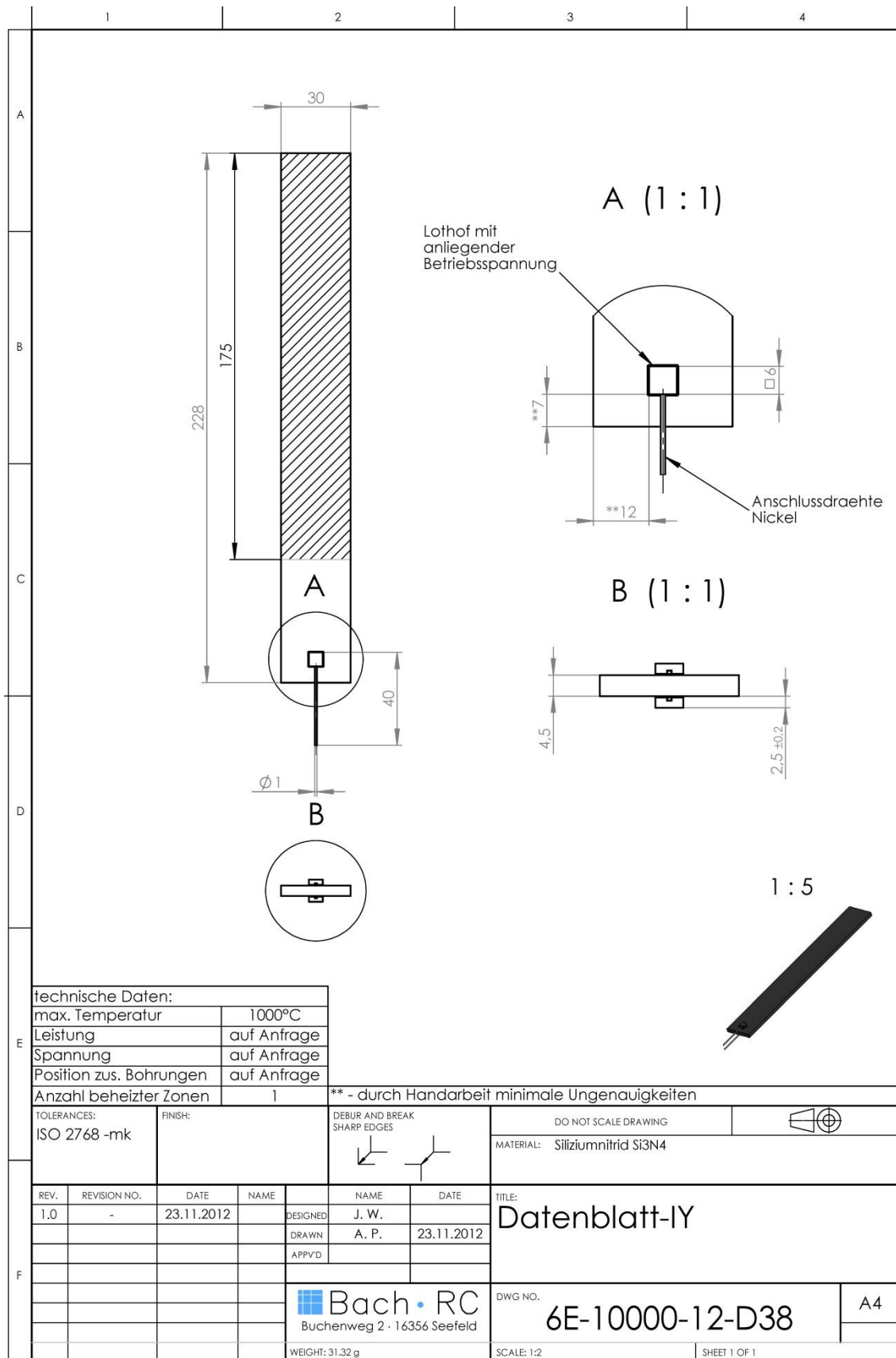
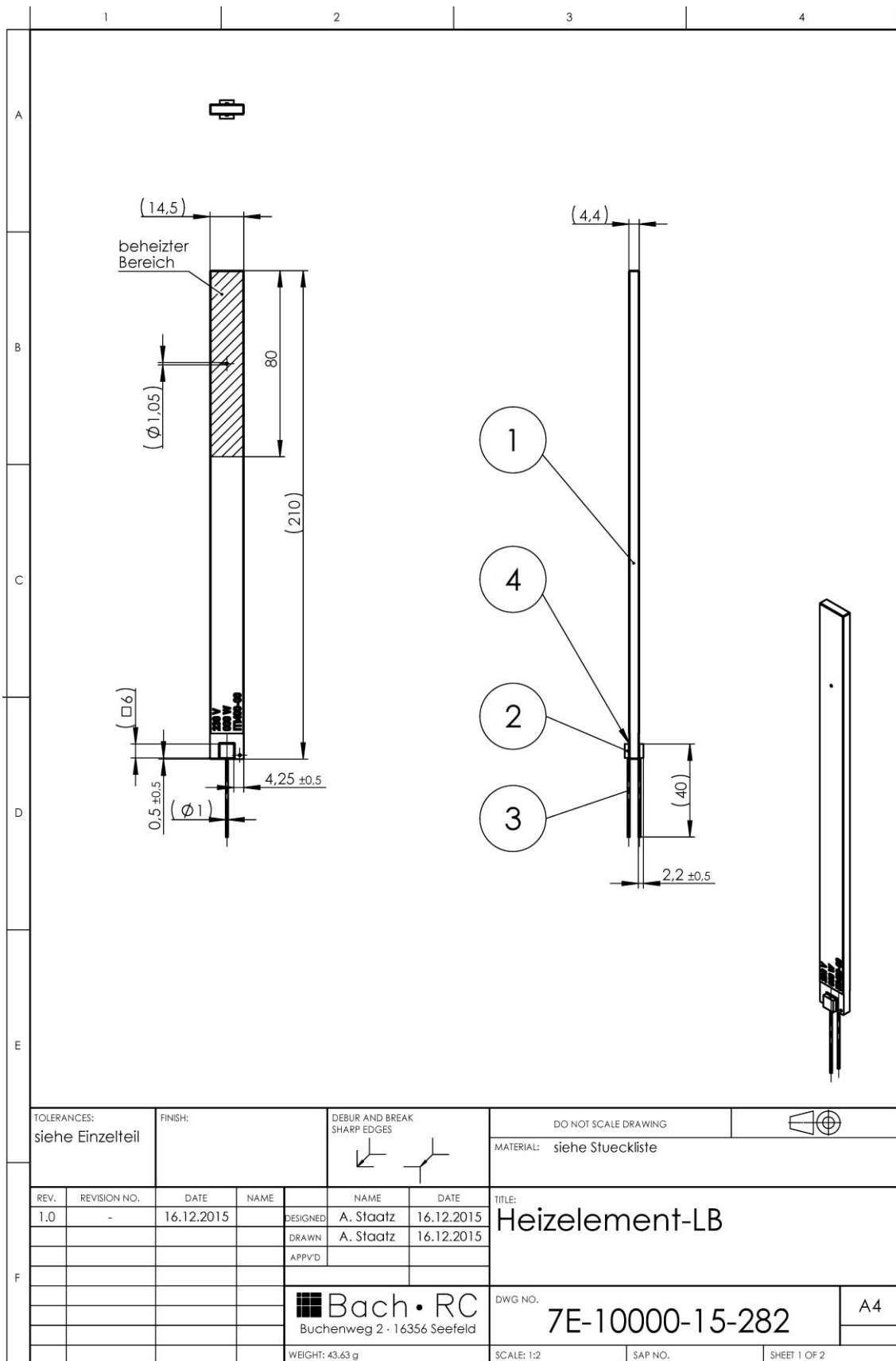


Abbildung 97 Datenblatt Strahlungsheizer STR228



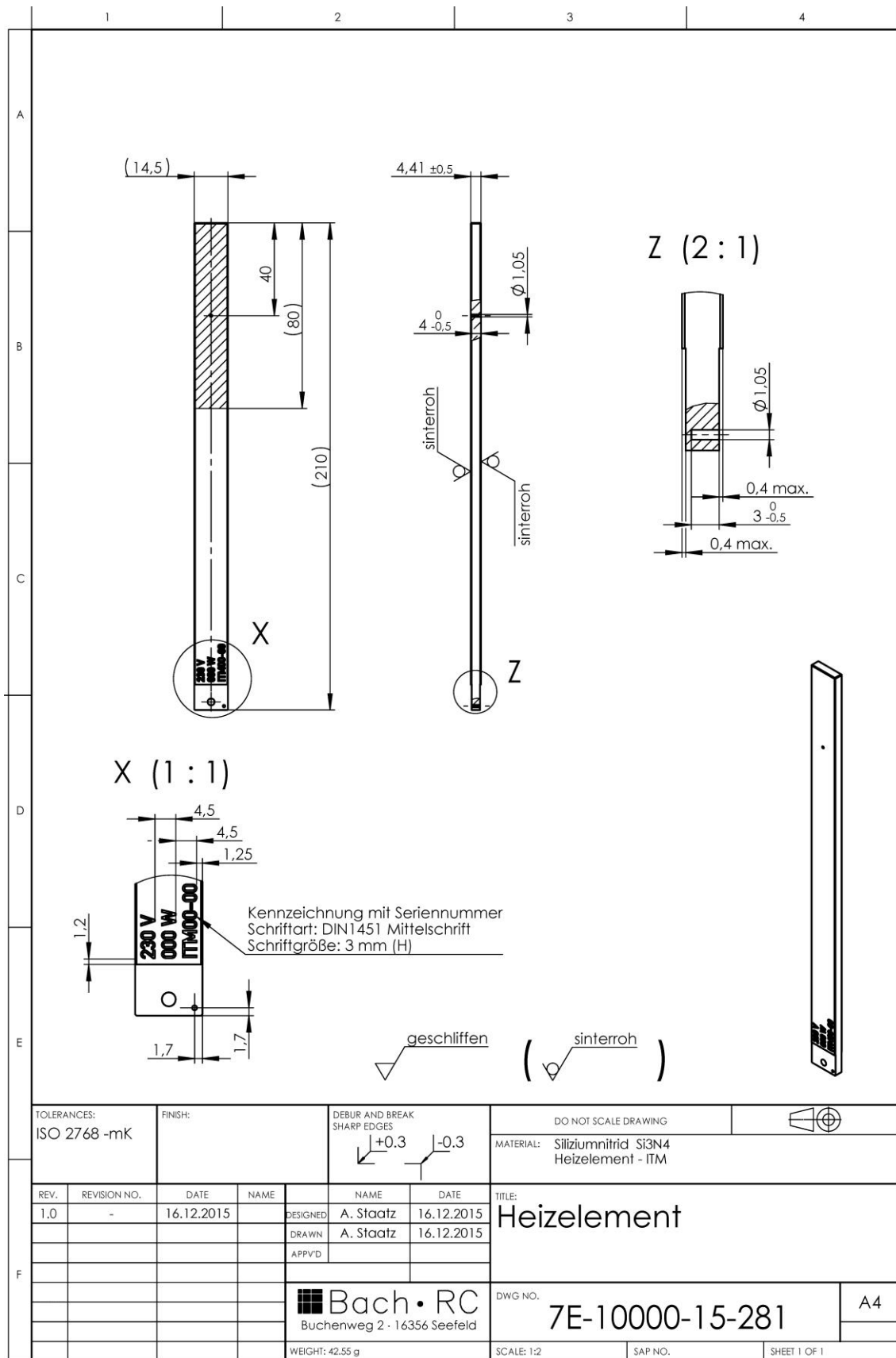
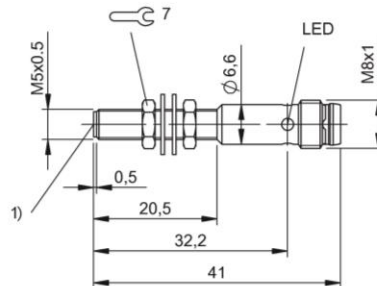


Abbildung 98 Fertigungszeichnungen der Heizelemente

Induktiver Sensor

BES 516-3005-G-E5-C-S49
Bestellcode: BES00HF
BALLUFF
sensors worldwide


1) aktive Fläche

- PNP
- Schließer (NO)
- 1.50 mm
- bündig
- Steckverbinder, M08x1-S49


Allgemeine Merkmale
 Zulassungen / Konformität

 Grundnorm
 Schutzart nach IEC 60529
 Funktionsanzeige
 Schaltabstandskennzeichen
 verpolungssicher
 Betriebsspannungsanzeige
 Kurzschlusschutz

 cULus
 CE
 IEC 60947-5-2
 IP67
 ja
 ■■
 ja
 nein
 ja

Elektrische Merkmale

 Anschlussart
 Bem.-Betriebsspannung U_e DC
 Bem.-Isolationsspannung U_i
 Bemessungsbetriebsstrom I_e
 Bemessungskurzschlussstrom
 Betriebsspannung U_B max. DC [V]
 Betriebsspannung U_B min. DC [V]
 Elektrische Ausführung
 Kleinsten Betriebsstrom I_m
 Lastkapazität max. (bei U_e)
 Leerlaufstrom I_o bedämpft max.
 Leerlaufstrom I_o unbed. max.
 Restwelligkeit max. (% von U_e)

 Steckverbinder
 24.0 V
 75 VDC
 100 mA
 100 A
 30.0 V
 10.0 V
 DC, Gleichspannung
 0 mA
 1.000 µF
 6.0 mA
 2.0 mA
 10 %

 Schaltausgang
 Schaltfrequenz f max. (bei U_e)
 Schaltfunktion
 Spannungsfall statisch max.

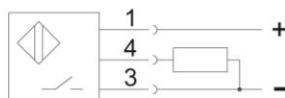
 PNP
 5000 Hz
 Schließer (NO)
 2.0 V

Mechanische Merkmale

 Anzugsdrehmoment
 Befestigungslänge
 Bemessungsschaltabstand S_n [mm]
 Durchmesser d1
 Gesicherter Schaltabstand S_a
 Mechanische Einbaubedingung
 Realschaltabstand S_r
 Steckerart
 Tiefe
 Umgebungstemperatur T_a max.
 Umgebungstemperatur T_a min.
 Werkstoff aktive Fläche
 Werkstoff Gehäuse

 1 Nm
 20.0 mm
 1.50 mm
 M05x0.5
 1.21 mm
 bündig
 1.50 mm
 M08x1-S49
 41.0 mm
 70 °C
 -25 °C
 PBT
 Stahl nichtrostend

Zusatztext

 Nach Beseitigung der Überlast ist der Sensor wieder funktionsfähig.
 EMV: Stoßspannungsfestigkeit; Externe Schutzschaltung notwendig. Dokument 825345, Abschnitt 2.

 Internet
 Balluff Germany
 Balluff USA
 Balluff China

 www.balluff.com
 +49 (0) 7158 173-0, 173-370
 1-800-543-8390
 +86 (0) 21-50 644131

 Begriffsbestimmungen siehe Hauptkatalog
 Änderungen vorbehalten

BES00HF_223509_18/07/15

1(1)

Abbildung 99 Datenblatt induktiver Drehzahlsensor

Saint-Gobain Proppants 16/30 Sintered Bauxite

Typical Properties

Size and Shape	
Sieve	Wt.% Retained
+16m	4.0%
+20m	86.0%
+30m	10.0%
+40m	—
<40m	0.0%

Median Particle Diameter = 0.971 mm
= 0.038 inch

Shape/Sphericity (Krumbein & Sloss) 0.9

Physical Properties

Bulk Density	2.02 g/cc 125 lbs/ft ³										
Specific Gravity	3.49 g/cc										
Absolute Volume	0.0347 gal/lb										
Acid Solubility	2.2%										
Crush Resistance (%)	<table border="1"> <tr> <td>5000psi</td><td>N/A</td></tr> <tr> <td>7500 psi</td><td>1.0%</td></tr> <tr> <td>10000 psi</td><td>2.5%</td></tr> <tr> <td>12500 psi</td><td>4.5%</td></tr> <tr> <td>15000 psi</td><td>9.0%</td></tr> </table>	5000psi	N/A	7500 psi	1.0%	10000 psi	2.5%	12500 psi	4.5%	15000 psi	9.0%
5000psi	N/A										
7500 psi	1.0%										
10000 psi	2.5%										
12500 psi	4.5%										
15000 psi	9.0%										

16/30 Sintered Bauxite
Conductivity (@ 300 F)



16/30 Sintered Bauxite
Permeability (@ 300 F)

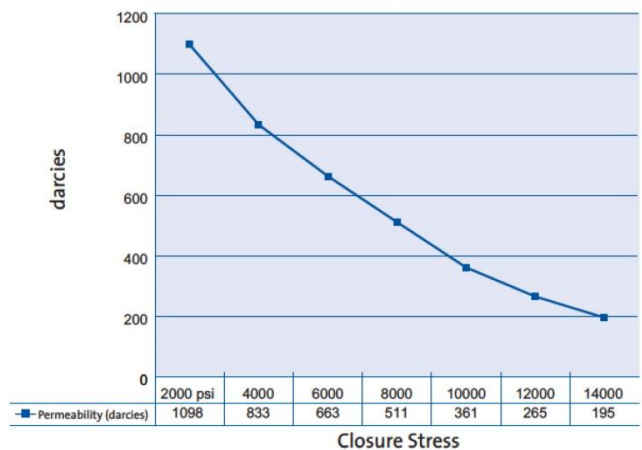


Abbildung 100 Datenblatt Partikel

10.4 Checkliste Versuchsdurchführung

Folgende Punkte sind nacheinander bei der Versuchsvorbereitung durchzuführen

Vor Versuchsbeginn

- Bodengruppe herausnehmen
 - o Ggf. Kupplung lösen
- Probenraum randvoll mit Partikeln füllen
- Bodengruppe vorsichtig wieder in die Lagerung und die Kupplung einführen
 - o Kupplung festziehen
- Partikel außerhalb des Probenraums entfernen
- Deckel aufsetzen
- Querträger positionieren
- Entlastungsvorrichtung einhängen
 - o Führungsbolzen muss leicht beweglich sein
- Halbschalen der Dämmung verschließen
- Kabel für Drehzahlsensor anschließen
- 230 V Stecker für Messtechnik einstecken
- Drehstrom 32 A Stecker für Heizung einstecken
- Drehstromstecker des Motors einstecken
- Stecker der Mehrfachsteckdosen gemäß Nummerierung in die Schaltbaren Steckdosen einstecken
- Thermoelement-Stecker überprüfen
- Messtechnik einschalten
- Messrechner hochfahren
- LabView starten (HT-Basis, ScherzelleV1)
- Messdatenerfassung starten
- Hauptschalter am Messplatz einschalten
- Heiztemperatur einstellen (Normalerweise 30 °C Hysterese)
- Heizer in LabView anschalten
- Bei Erreichen der Zieltemperatur, diese ca. 30 min konstant halten
- Motor einschalten Drehzahl am FU ca. 100
- Versuch läuft

Nach Versuch

- Vorrichtung auskühlen lassen
 - o Ggf. Dämmung öffnen
- Entlastungsvorrichtung aushängen
- Dämmung öffnen, Halbschalen etwas zur Seite schieben
- Querträger demontieren
- Deckel der Scherzelle abnehmen
- Bodengruppe herausziehen
 - o Kupplung lösen
- Partikelprobe entnehmen